

熱交換塗料の特性評価

著者	宮崎 悠造
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2009
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001441/

修士学位論文

熱交換塗料の特性評価

平成 21 年度
(2010 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻
宮 崎 悠 造

—目次—

第1章 序論

1.1 研究背景	5
1.2 従来の研究	6
1.2.1 日本建築総合試験所で行われた試験	
1.2.2 熱交換塗料による橋梁舗装面の道路凍結対策	8
1.3 研究目的	11

第2章 ドライアイスを使用した冷却実験

2.1 実験目的	13
2.2 試験片	
2.3 実験装置	14
2.3.1 実験装置概要	
2.3.2 熱流束測定	15
2.3.3 温度測定	16
2.3.4 データロガー	17
2.3.5 熱伝導ペースト	18
2.3.6 断熱材	
2.4 実験手順	19
2.5 熱伝導率算出方法	20
2.6 実験結果	21

第3章 ライト照射による加熱実験

3.1 実験目的	25
3.2 実験装置	
3.2.1 実験装置概要	
3.3 実験手順	26
3.4 実験結果	27

第4章 ペルチェ素子を使用した冷却実験

4.1 実験目的	31
4.2 実験装置	32
4.2.1 実験装置概要	
4.2.2 冷却部	33
4.3 実験手順	35
4.4 熱伝導率算出方法	36

4.5	実験結果	37
第5章 ヒーターを使用した加熱実験		
5.1	実験目的	55
5.2	実験装置	56
5.2.1	実験装置概要	
5.2.2	データロガー	57
5.2.3	加熱部	58
5.3	実験手順	59
5.4	実験結果	60
第6章 放熱量測定の実験		
6.1	実験目的	78
6.2	実験装置	
6.2.1	実験装置概要	
6.3	実験手順	79
6.4	実験結果	80
第7章 考察		
7.1	低温域における温度特性	88
7.2	高温域における温度特性	
7.3	塗料内部での成分偏りが温度特性に及ぼす影響	89
第8章	結論	90

参考文献

謝辞

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年、地球温暖化や CO₂ 問題など、地球環境保護への取り組みが世界的に高まっている。都市部の気温がその周辺の非都市部に比べて異常な高温を示す現象をヒートアイランド現象と呼ぶ、この現象により都市部が高温になり自然環境が影響を受け、住民の生活や健康にも影響を及ぼす。このため、様々なヒートアイランド現象を緩和する対策が行われている。塗料業界では建築物の外壁に塗布することにより外の熱が建築物内へ入ってくるのを遮断し、冷暖房にかかるエネルギーの節約する遮熱塗料などが開発されている。本研究では、その遮熱塗料のひとつとされる熱交換塗料に着目した。現在、主流となっている遮熱塗料は太陽光を反射させることにより夏場の室温上昇を防いでおり、高反射塗料と呼ばれています。太陽光反射型の塗料には問題点もあり、まず一つ目に塗装面が汚れてしまうと太陽光の反射率が落ち、逆に熱を内部に籠らしてしまう可能性があること、二つ目に太陽光を反射させた先の物体に影響を及ぼすことである。熱交換塗料は光反射に頼らない遮熱塗料であるといわれている。また、熱交換塗料は夏季のヒートアイランド対策だけでなく、冬季の道路凍結対策等にも使用されることがあるがまだ正確な特性は明らかになっていない。そこで本研究により熱交換塗料が持つ高温時と低温時の伝熱特性を実験により評価した。

1.2 従来の研究

1.2.1 日本建築総合試験所で行われた試験

試験は、アルバー工業の依頼により、日本建築総合試験所が平成 17 年に実施した、熱交換塗料の遮熱性能試験である。この試験の目的としては、熱交換塗料と同系色の一般塗料（市販品）と比較した場合の遮熱性能の測定である。試験体には 300mm×300mm×厚さ 5mm のスレート表面に熱交換塗料及びその比較用一般塗料を塗布したものを各 1 体であり、乾燥養生後使用された。なお、熱交換塗料及び一般塗料の色相(色差及び光沢度)を測定した結果、色差については僅かで、色が違う程度であるが、光沢度は一般塗料のほうが高くなっている。試験体の仕様は表 1 に示される。

表 1 試験体の仕様

試験体	熱交換塗料	一般塗料
塗料の種類	水性塗料	アクリル樹脂系水性塗料
商品名	熱交換塗料 タフコート D47	—
塗布量	塗布時:400g/m ² (200g/ m ² × 2 回) 膜圧:80 μ m (40 μ m× 2 回)	塗布時:400g/ m ² (200g/ m ² × 2 回) 膜圧:—
色相	色 : グレー 色差 L=66.8 a=0.16 b=0.14 光沢度 (60℃) :2.6	色 : グレー 色差 L=68.7 a=−0.44 b=1.62 光沢度 (60℃) :26.9
下地材	スレート 厚 5mm	

試験体は太陽光が直接当たるように水平に設置され、試験体の表裏面温度、試験体の貫流熱量及び水平面全天日射量を、それぞれ T 熱電対（φ 0.2mm）、熱流計、精密全天日射計及びデータロガーにより 1 分間隔で測定された。試験期間は、平成 17 年 5 月 11 日の 8 時～17 時までの 9 時間である。試験結果としては熱交換塗料及び一般塗料の表裏面温度測定の結果及び貫流熱量の測定結果、水平面全天日射量の測定結果から、熱交換塗料及び一般塗料の貫流熱量が比較され、熱交換塗料は一般塗料の約 7 割程度の貫流熱量となり約 3 割が遮熱されているという結果が得られている。また、試験期間中において表裏面温度が安定している 13 時～13 時 50 分の間の測定データを用いて、(1.1)式より見かけの熱抵抗を計算した結果、熱交換塗料で平均 0.043W/(m²・K)、一般塗料で平均 0.032 W/(m²・K)という結果が得られている。

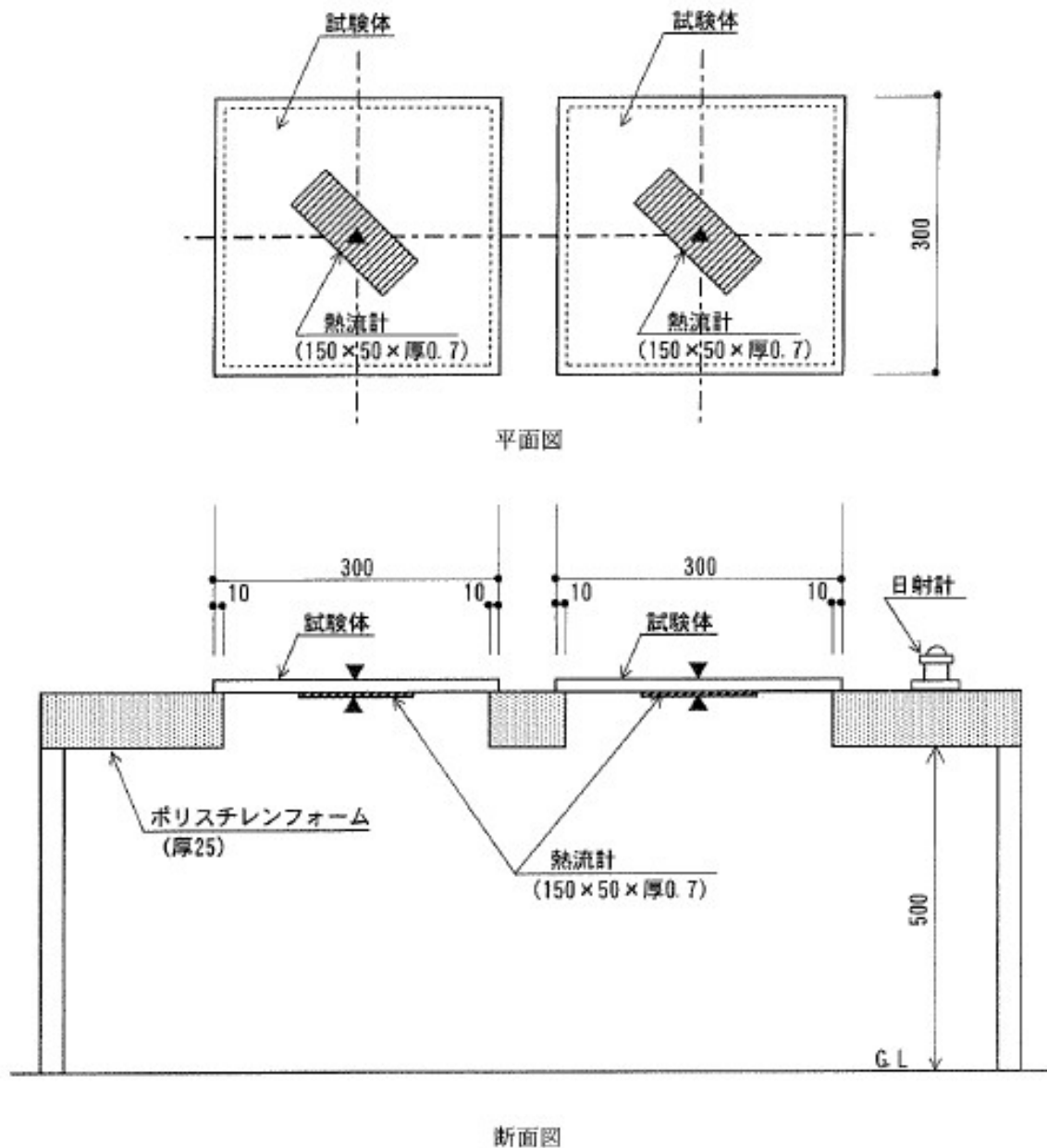
$$R_c = (\theta_o - \theta_i) / Q \quad (1.1)$$

ここに、 R_c ：見掛けの熱抵抗[$m^2 \cdot K/W$]

θ_o ：表面温度[$^{\circ}C$]

θ_i ：表面温度[$^{\circ}C$]

Q ：貫流熱量[W/m^2]

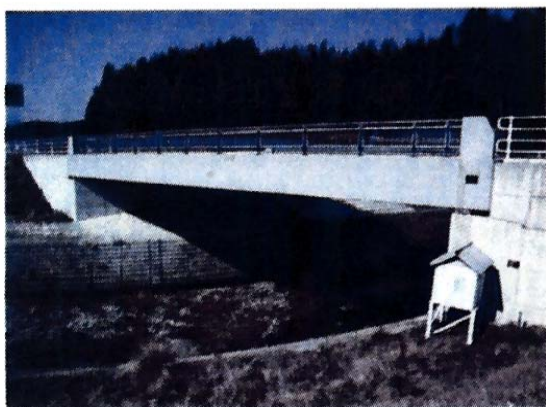


注) ▲印は、表裏面温度測定位置を示す。

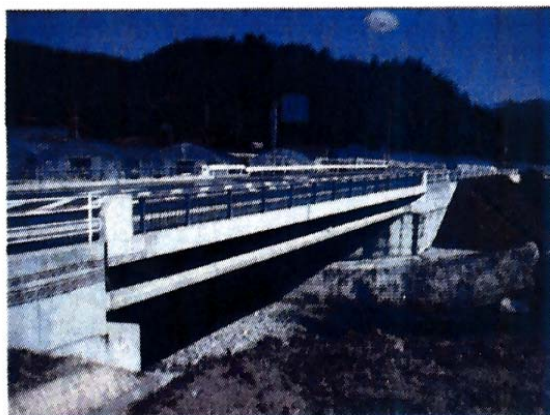
図 1.1 遮熱性能試験装置

1.2.2 熱交換塗料による橋梁舗装面の道路凍結対策

この試験は熱交換塗料の冬季における効果・凍結対策を検証するため、できるだけ同条件の橋梁で従来型の塗料と比較することを目的として行われた。実施期間は平成 18 年 2 月～平成 20 年 3 月、測定場所は佐賀県佐賀市にある二つの橋(図 1.2)を利用して行われた。まず一つ目が熱交換塗料を塗布した宿橋、二つ目は比較用の合瀬橋で行われた。試験対象となった宿橋、合瀬橋の表面温度と宿橋周辺の外気温度が計測された。



(a)宿橋



(b)合瀬橋

図 1.2 実験対象になった橋

熱交換塗料の効果として図 1.3 に示されるように外気温が 0°C 以下 $\sim 2^{\circ}\text{C}$ までの効果は著しい。アスファルト舗装面においてコンクリートに塗布された宿橋には凍結はなく、一方、合瀬橋は凍結域となっている。また、図 1.4 のように、外気温 $-2^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ 域では、宿橋に於いても凍結域となっている。宿橋、合瀬橋の舗装面が凍結域となっているが、外気温の上昇に伴う凍結域解除と時間は宿橋が明らかに早い事が分かる。図 1.5 で明らかな様にコンクリートに直接、熱交換塗料を塗った宿橋においては、外気温 -3°C 以下の条件でも 0°C 以下にならないことがわかる。

この実験の結論として、熱交換塗料の冬期に於ける橋梁道路表面の凍結防止に大いに効果があると思われる。熱交換塗料を塗布した橋は 0 度以下でも冷めにくく、 0°C から気温が上昇すると温まりやすい。

尚、夏期に行われた同様の実験から真夏に於ける道路表面の冷却効果も確認されている。

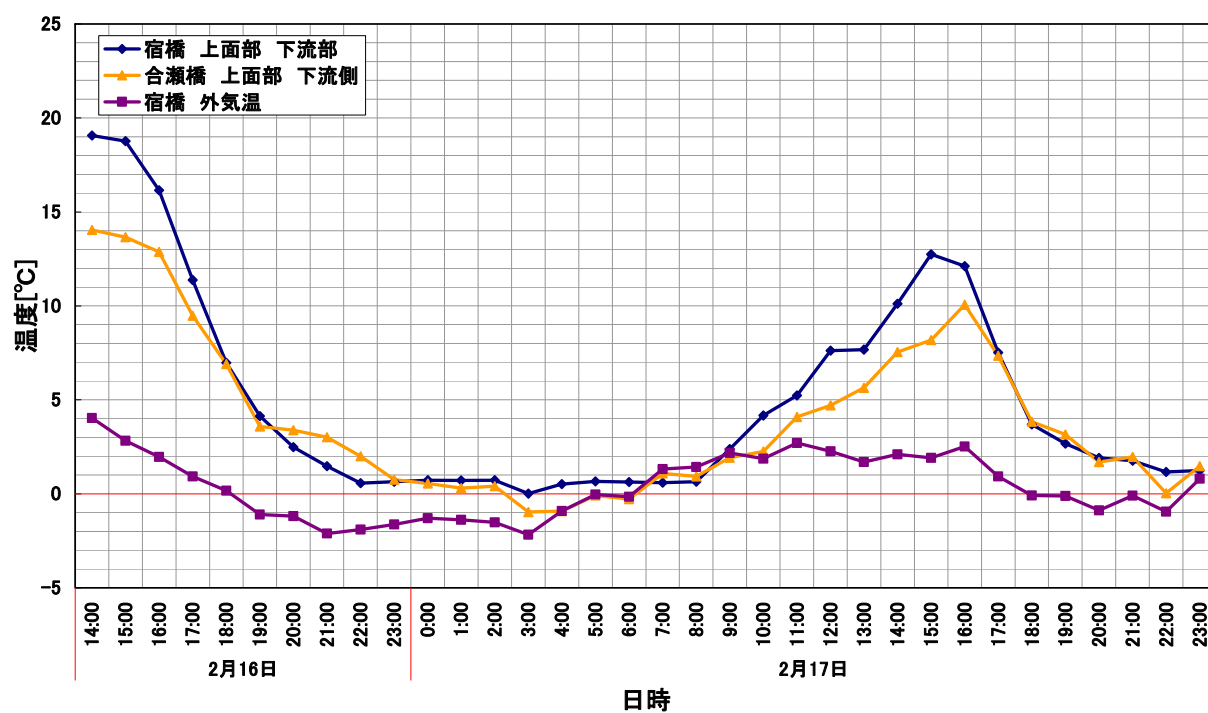


図 1.3 2 月 16 日から 2 月 17 日の温度変化

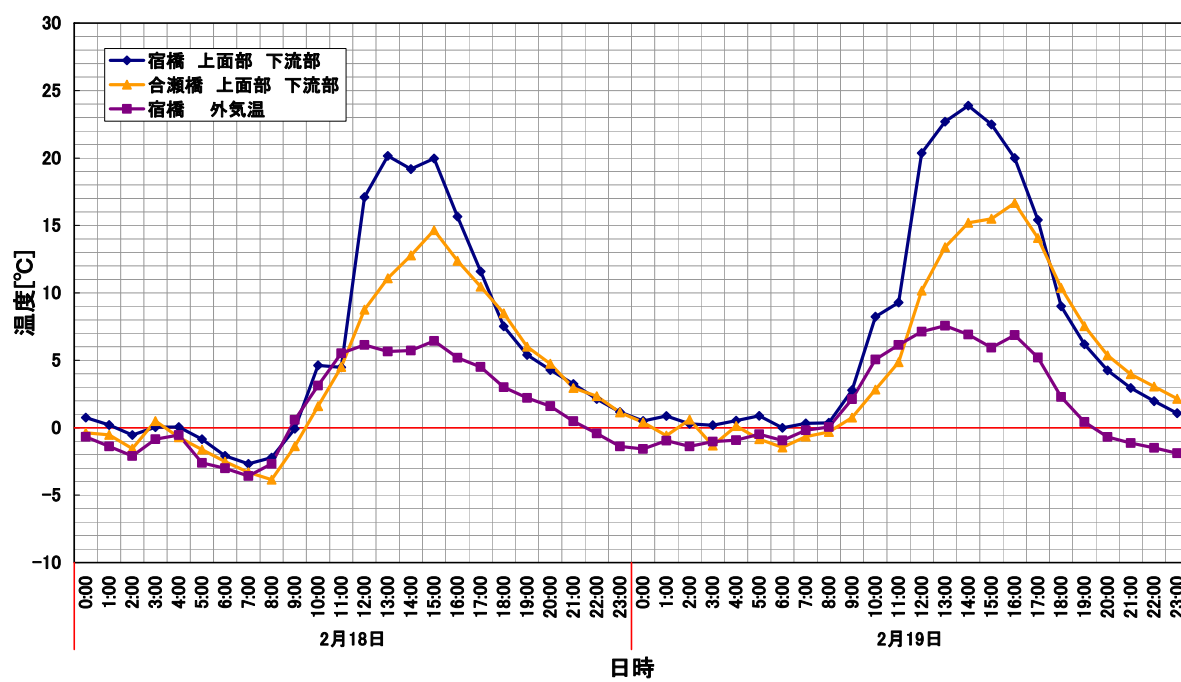


図 1.4 2 月 18 日から 2 月 19 日の温度結果

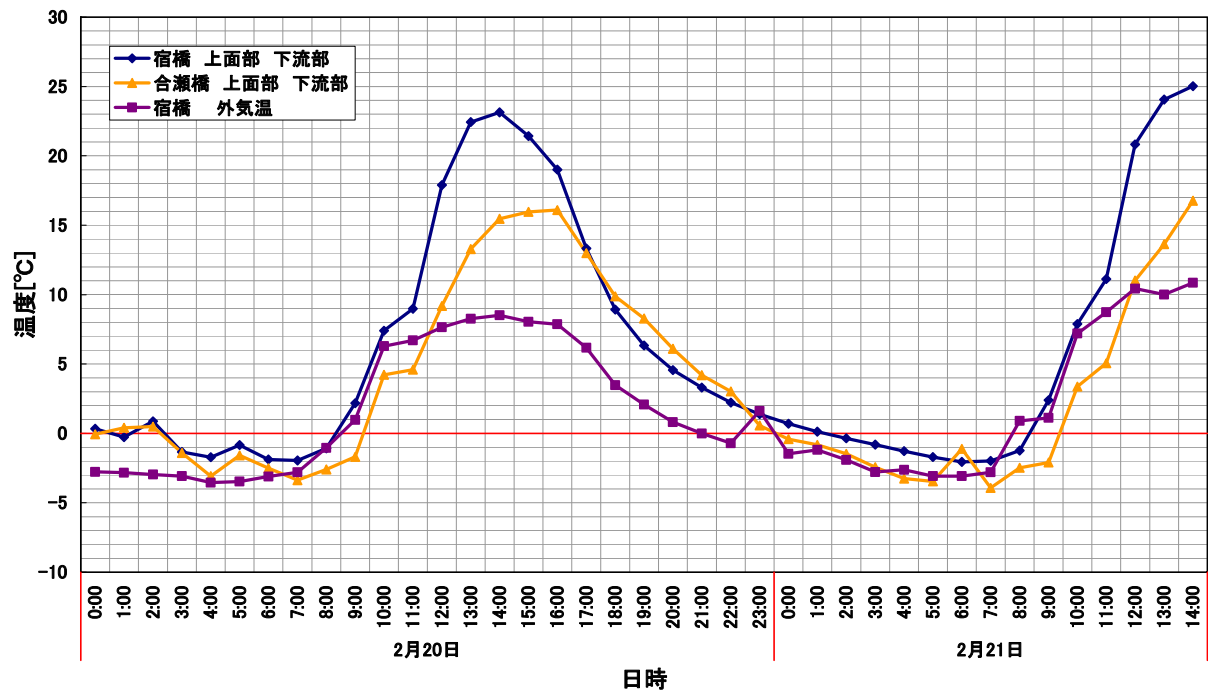


図 1.5 2 月 20 日から 2 月 21 日の温度結果

1.3 研究目的

前節の従来の研究で述べられているように、建築分野の実験では試験対象となる塗料を箱等に塗って内部の温度や熱の通り具合を調べた実験が行われている。しかしこの方法では箱の大きさやその固定方法、周囲の環境、温度条件等により熱移動量、測定温度に差異を生じ、試験対象となった塗料の特性を調べたとは言えない。そこで、本研究では周囲の条件により差異を生じない物理量を実験により測定、検討していく。

具体的な実験内容としては、断熱材で作製した保温箱の天井部に試験片をはめ込み、保温箱内にドライアイスで冷媒として入れ、保温箱外部の大気温と内部の冷やされた空気の温度差を利用して試験片に熱の流れを起こす。そのときの試験片両面の表面温度と熱流束からフーリエの法則により熱伝導率を求めるドライアイスを使用した冷却実験。断熱材で作製した保温箱の天井部に試験片をはめ込み、外側から試験片にライトをあて加熱し、試験片に温度差をつくり試験片に熱の流れを起こす。そのときの試験片両面の表面温度と熱流束からフーリエの法則により熱伝導率を求めるライト照射実験。温度差による塗料の温度特性(低温時)を調べるため冷却にペルチェ素子を使い、電氣的に温度制御を行ったペルチェ素子による冷却実験。温度差による塗料の温度特性(高温時)を調べるため加熱にヒーターを使い、電氣的に温度制御を行ったヒーターによる冷却実験。これらの実験から熱交換塗料が持つ熱伝導率等の伝熱特性を調べた。

第 2 章

ドライアイスを使用した 冷却実験

2.1.実験目的

建築分野の実験では試験対象となる塗料を箱等に塗って内部の温度や熱の通り具合を調べた実験が多い。その方法では周囲の境界条件の違いにより熱移動量、測定温度に差異を生じ、試験対象となった塗料の特性を調べたとは言えない。そこで、本実験では境界条件により差異を生じない物理量として熱力学的特性のひとつである熱伝導率を測定する。ドライアイスを使用した実験では低温での熱交換塗料の伝熱特性を調べるためにドライアイスで冷却したときの熱伝導率を計測する。

2.2 試験片

図 2.1 に示すように試験片の作製方法は正方形の枠に塗料を流し込み、数週間ほど乾燥させ、完全に乾いたことを確認して枠を外し、試験片を作製した。作製した試験片形状を図 2.2、仕様を表 2.1 に示す。

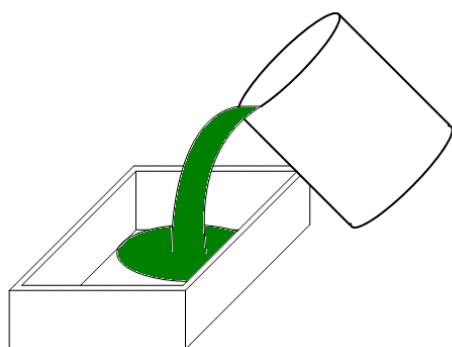


図 2.1 試験片作成方法

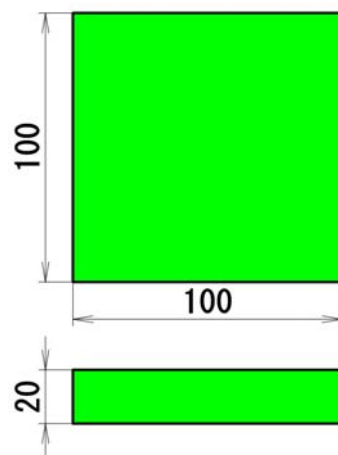


図 2.2 試験片寸法

表 2.1 試験片の仕様

試験体	熱交換塗料	比較塗料
塗料の種類	水性塗料	アクリル樹脂系水性塗料
商品名	熱交換塗料 タフコート D47	つやあり EXE
試験片大きさ	100×100×20	100×100×20

2.3 実験装置

2.3.1 実験装置概要

図 2.3 に示すように、断熱材で作製した保温箱の天井部に試験片をはめ込み、保温箱内部にドライアイスで冷媒として入れ、保温箱外部の大気温と内部の冷やされた空気の温度差を利用して試験片に熱の流れを起こす。そのときの試験片両面の表面温度と熱流束からフーリエの法則により熱伝導率を求める。試験片表面温度は K 熱電対(素線径 ϕ 0.3[mm])、熱流束値は熱流束センサーによりサンプリング周期は 10[min]で測定した。

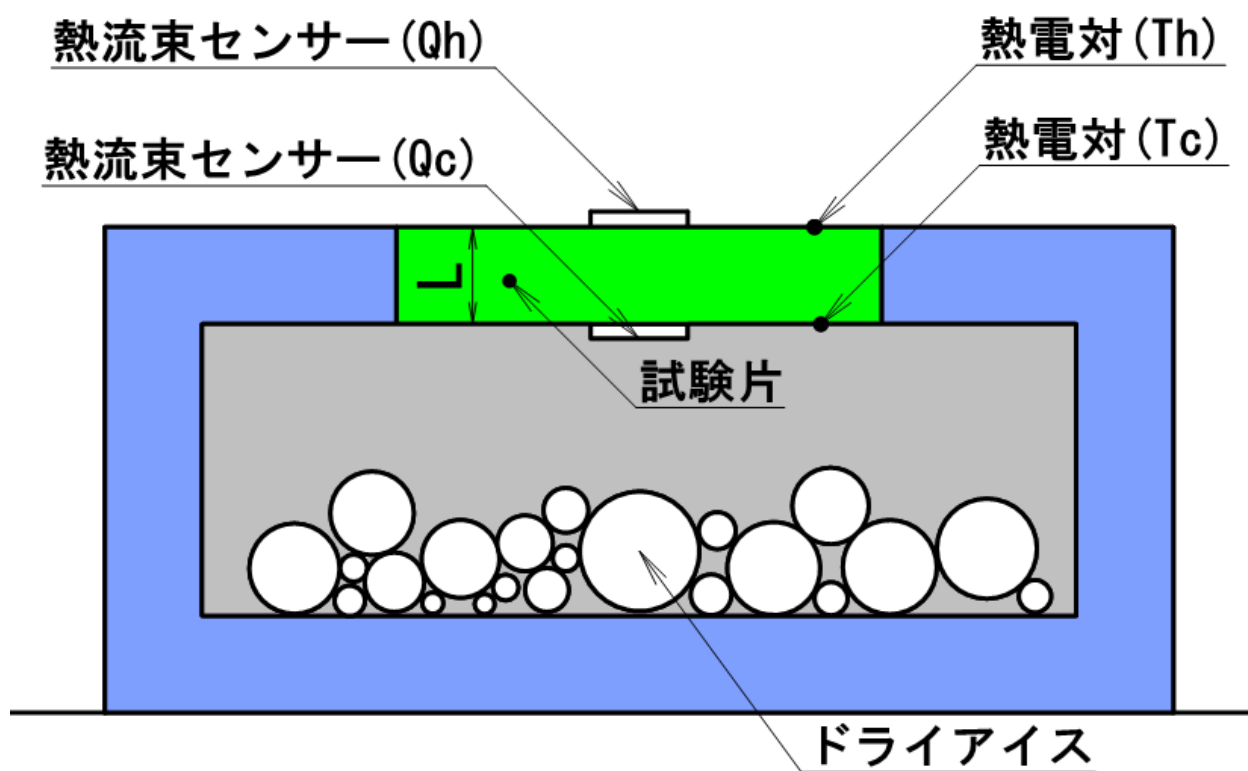


図 2.3 ドライアイスを使用した実験装置

2.3.2 熱流束測定

熱伝導率を求めるために試験片に流れる熱流束を計測する。今回の実験では図 2.4 の CAPTEC 社製の熱流束センサーを使用し計測した。本センサーは、熱がセンサー表面からセンサー内部へ流入すると、サーモパイル(銅-コンスタンタン)の各々の接点で、通過する熱エネルギーに差が生じるように設計されている。熱流束センサーの仕様を表 2.2 に示す。



図 2.4 熱流束センサー

表 2.2 熱流束センサー

形式	C A P T E C 社製熱流束センサーHF-05
センサーサイズ	10×10×0.4(mm)
代表感度	0.3(μ V/W/m ²)
計測温度	-180～200℃
精度	5%以内
熱抵抗	0.00015(℃/W/m ²)
応答速度	約 200ms

2.3.3 温度測定

熱伝導率を求めるために高温側試験片温度と低温側試験片温度の差が必要なため福音特殊金属社製の熱電対を使い高温側試験片温度(T_h)、低温側試験片温度(T_c)の計測を行った。実験に使用したガラス繊維とテフロン製の2種類の熱電対を図2.5、図2.6にそれぞれ示す。結露に触れる可能性がある低温側には耐水性のあるテフロン製のものを使用した。熱電対(ガラス繊維)の仕様を表2.3、熱電対(テフロン)の仕様を表2.4に示す。



図 2.5 熱電対(ガラス繊維)



図 2.6 熱電対(テフロン)

表 2.3 熱電対(ガラス繊維)

形式	福音特殊金属社製 K - H
素線	ガラス繊維
素線径	0.32mm
使用温度範囲	常温～250℃
適用	耐熱性あり、耐水性なし

表 2.4 熱電対(テフロン)

形式	福音特殊金属社製 K - 6F
素線	テフロン
素線径	0.32mm
使用温度範囲	－250℃～200℃
適用	耐水、耐熱、耐油あり

2.3.4 データロガー

高温側熱流束(Q_h)、低温側熱流束(Q_c)、高温側試験片温度(T_h)、低温側試験片温度(T_c)の計測、記録を図 2.7 のデータロガー①横河電機製 3087 形ポータブルハイブリットレコーダで行った。このデータロガーは記録方法が紙媒体なため計測時間とデータ整理の関係から計測周期を 10min とした。データロガーの仕様を表 2.5 に示す。



図 2.7 データロガー①

表 2.5 データロガー①

形式	横河電機製 3087 形ポータブルハイブリットレコーダ
レンジ(直流電圧)	$\pm 20\text{mV}$
最大分解能	$5\mu\text{V}$
測定周期	1min~24 h

2.3.5 熱伝導ペースト

熱流束センサーと測定対象物の間に隙間があると正確な熱流束が測定できない可能性がある。そのため熱流束センサーと測定対象物の間に図 2.8 の熱伝導ペーストを塗り密着させた。熱伝導ペーストの仕様を表 2.6 に示す。



図 2.8 熱伝導ペースト

表 2.6 熱伝導ペースト

形式	KF 社製 1201 熱伝導ペースト
使用可能温度	-40℃～200℃

2.3.6 断熱材

ドライアイスを使用した実験装置の保温箱に断熱材を使用した。断熱材には手に入りやすく、加工しやすい図 2.9 のスタイロフォームを選択した。断熱材の仕様を表 2.7 に示す。



図 2.9 断熱材

表 2.7 断熱材

形式	スタイロフォーム
熱伝導率(W/m・k)	0.028 以下

2.4 実験手順

以下の手順に従って実験を行う。

1. データロガーの電源を入れ熱流束センサー、熱電対の接続を確認する。
2. データロガーで計測を始める
3. 計測開始から 1 分後から保温箱内部にドライアイス 1.5kg 入れ冷却を開始する。
4. 保温箱内部の温度が外気温と等しくなったところで計測終了。
5. 熱交換塗料、比較塗料各試験片を 3 枚作製し、3 回ずつ実験を行う。
6. 実験終了

2.5 熱伝導率算出方法

図 2.10 にドライアイスを使用した冷却実験で使用した試験片の断面を模式的に示す。この試験ではフーリエの熱伝導の法則を使い熱伝導率を求める。熱は温度の高い場所から低い場所へと移動する。このような物体内の熱の移動は最も基本的な伝熱形態の一つであって、これを熱伝導とよぶ。そして熱の流れる方向の温度勾配を $dT/dx[\text{K/m}]$ とすると、この熱流に垂直な単位面積を単位時間に通過する熱量 $q[\text{W/m}^2]$ は一般に次の(2.1)式ように書き表すことができる。

$$q = \lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

ここで比例定数 $\lambda [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ は各物質に固有の数値で、熱伝導率と呼ばれる。なお q は一般的に熱流束 $[\text{W}/\text{m}^2]$ と呼ばれている。

求めたい熱伝導率 λ は(2.1)式より

$$\lambda = \frac{dx \cdot q}{dT} \quad (2.2)$$

となる。

この(2)式に実際の試験値を入れると(2.3)式のようになる。

dx は試験片厚さ L 、 q は高温側熱流量と低温側熱流量 $(Q_h + Q_c)/2$

dT は高温側試験片温度と低温側試験片温度の温度差 $T_h - T_c$

$$\lambda = \frac{L(Q_h + Q_c)}{(T_h - T_c) \cdot 2} \quad (2.3)$$

となり、熱伝導率 λ が求まる。

λ : 熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

Q_h : 高温側熱流量 $[\text{W}/\text{m}^2]$

Q_c : 低温側熱流量 $[\text{W}/\text{m}^2]$

L : 試験片厚さ $[\text{m}]$

T_h : 高温側試験片表面温度 $(^\circ\text{C})$

T_c : 低温側試験片表面温度 $(^\circ\text{C})$

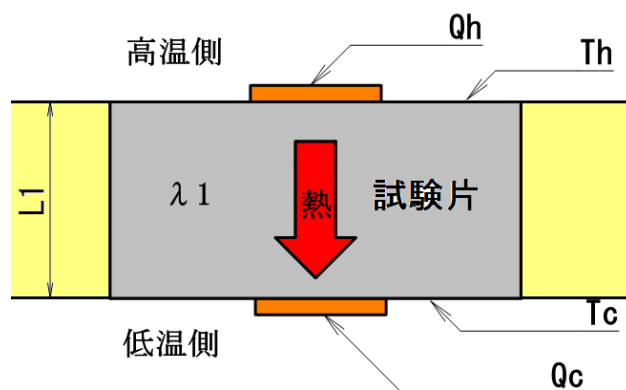


図 2.10 実験で使用した試験片の断面模式図

2.6 実験結果

図 2.11 はドライアイスを冷媒として熱交換塗料及び比較塗料より作製された試験片について、冷却実験を行った場合の高温側、低温側試験片温度の時間変化を示す。実験開始後 200 分程度までドライアイスの冷氣により熱交換塗料及び比較塗料の低温側試験片温度と高温側試験片温度は急激に低下し、その後、大気より試験片を通して伝わる熱によりドライアイスの昇華の速度が定常状態となり、徐々に増加していく。1500 分程度でドライアイスが箱内でなくなり試験片温度の上昇が速くなる。1500 分程度までの熱交換塗料と比較塗料の温度変化はさほど差はないが、1500 分以降温度変化に差を生じ熱交換塗料の温度上昇は比較塗料の温度上昇に比較して速くなっている。

図 2.12 は実験で計測された高温側試験片温度と低温側試験片温度の温度差を時間変化で示している。冷媒となるドライアイスを保温箱内部に入れる実験開始から低温側試験片温度が急激に下がるため温度差も急激に大きくなる。その後 1500 分まで熱交換塗料と比較塗料の温度差は同じように小さくなっていき、1500 分以降では熱交換塗料の温度差が急激に小さくなった。

図 2.13、は、実験よりもとめられた熱交換塗料及び比較塗料の熱流束を示す。高温側、低温側試験片表面温度の変化に伴い熱流束が変化しているのがわかる。実験開始後、試験片温度が急激に変化する 200 分程度まで熱流束は急激に大きくなりドライアイスの昇華速度が安定的な 1500 分程度までは熱流束はほぼ一定の値となっている。1500 分以降ドライアイスがなくなるために、低温側試験片温度が上昇するのに伴い熱流束は急激に減少する。

図 2.14 は実験で計測された試験片温度と熱流束より求めた熱伝導率を示す。熱交換塗料及び比較塗料の熱伝導率は熱流束が安定する実験開始後 200 分程度から 1500 分程度まではほぼ一定値となり、その後、ドライアイスが完全に昇華してしまいなくなることにより箱内の温度が上昇し、試験片の高温側と低温側の温度差および熱流束が小さくなることにより熱伝導率の計算誤差が大きくなるために、熱伝導率の変動が大きくなっていると考えられる。図 2.13 の熱流束の結果から分かるように熱交換塗料は比較塗料に比べて熱が流れにくく、図 2.14 に示されるように比較塗料の場合に比べて熱伝導率は小さくなっている。

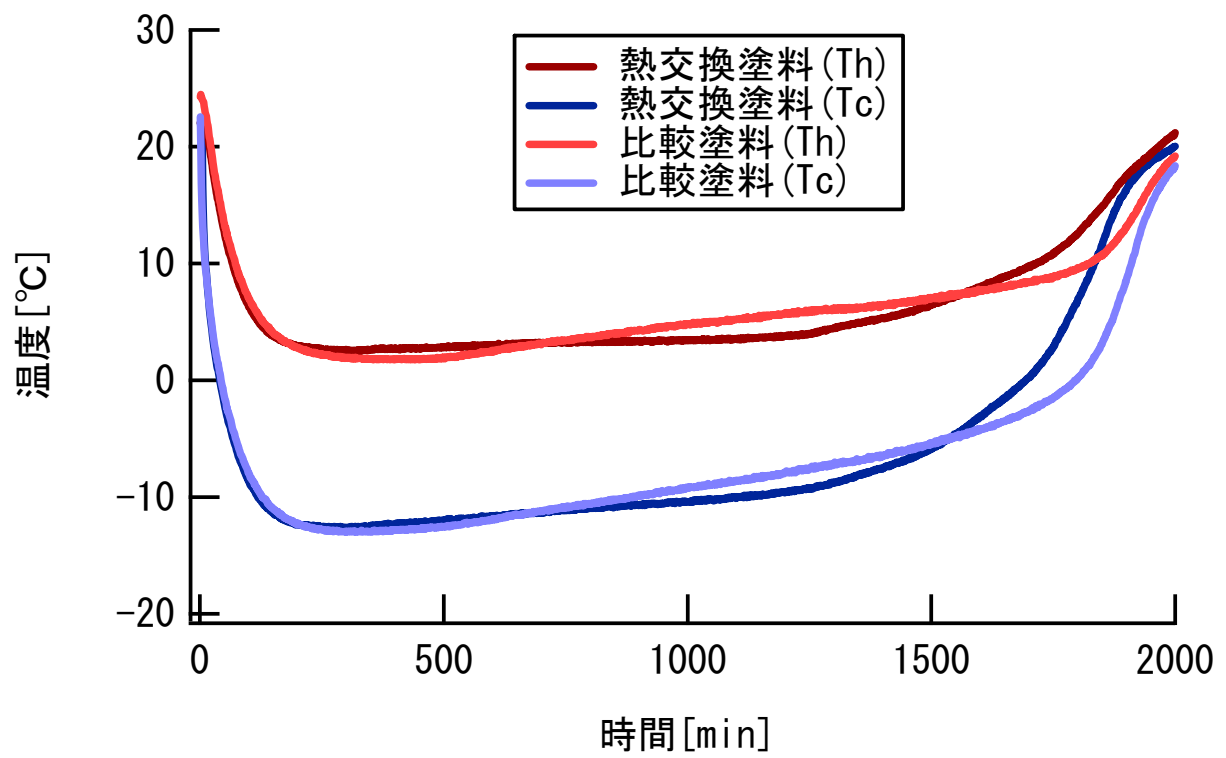


図 2.11 試験片温度

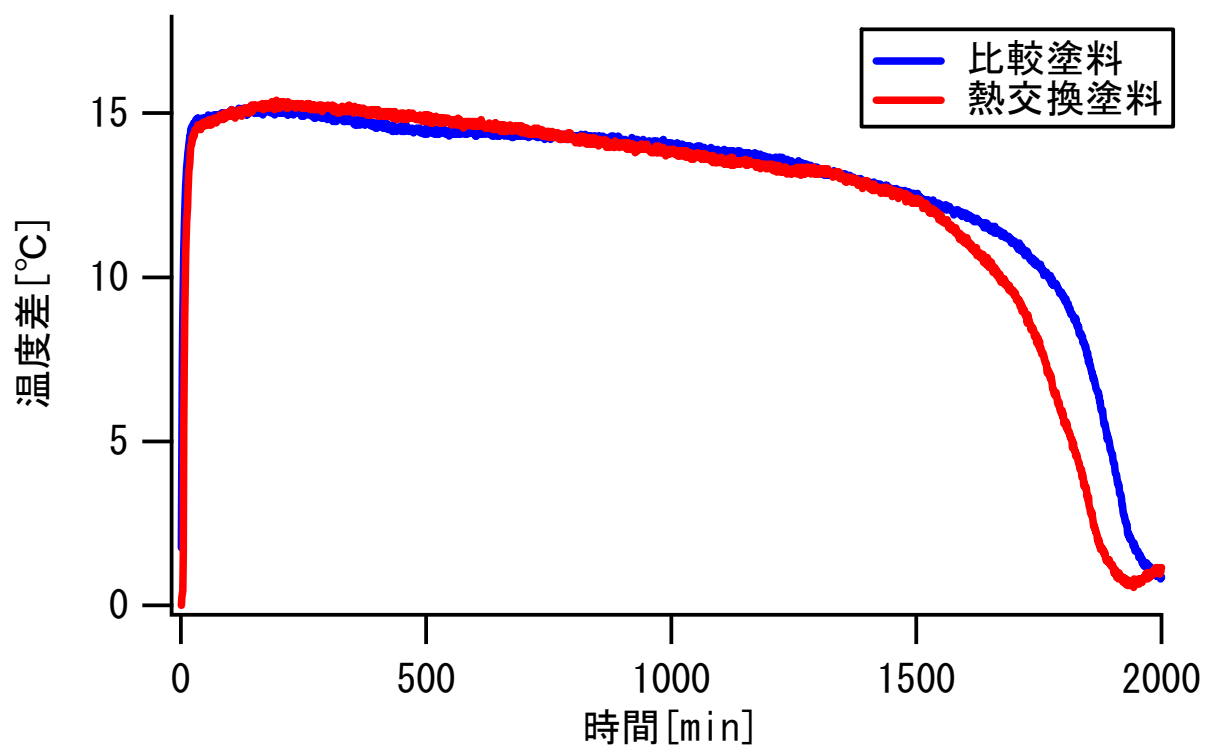


図 2.12 試験片温度差

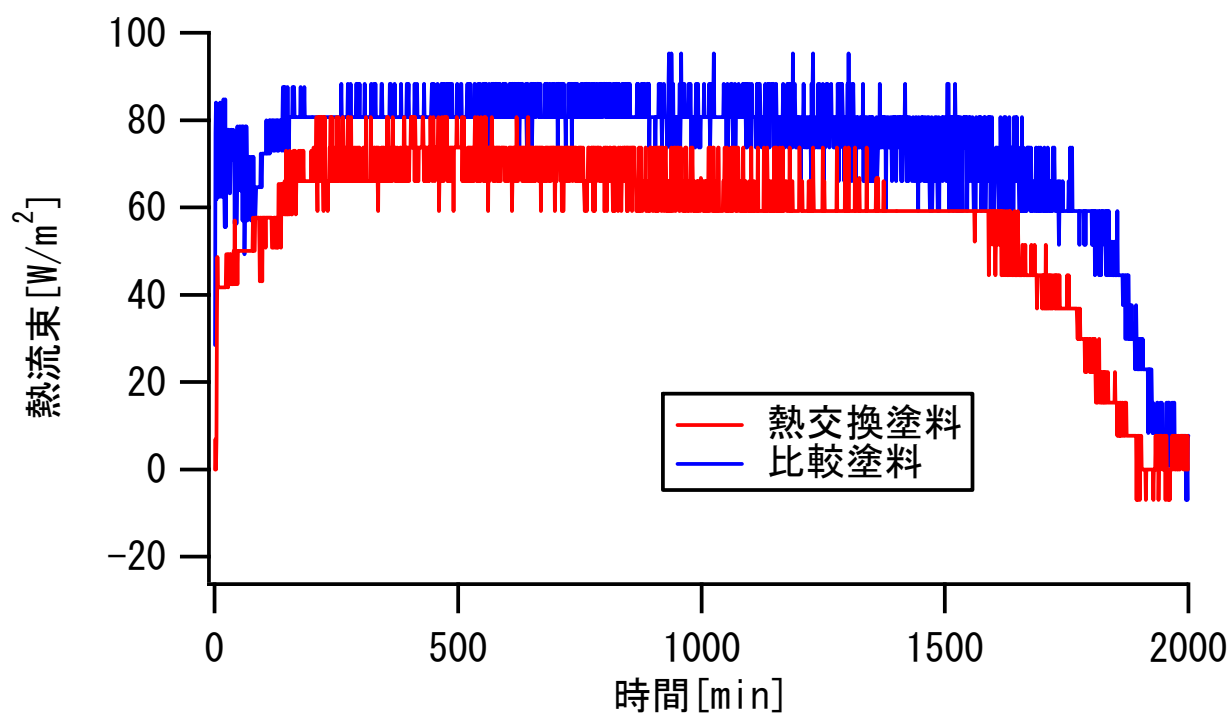


図 2.13 熱流束

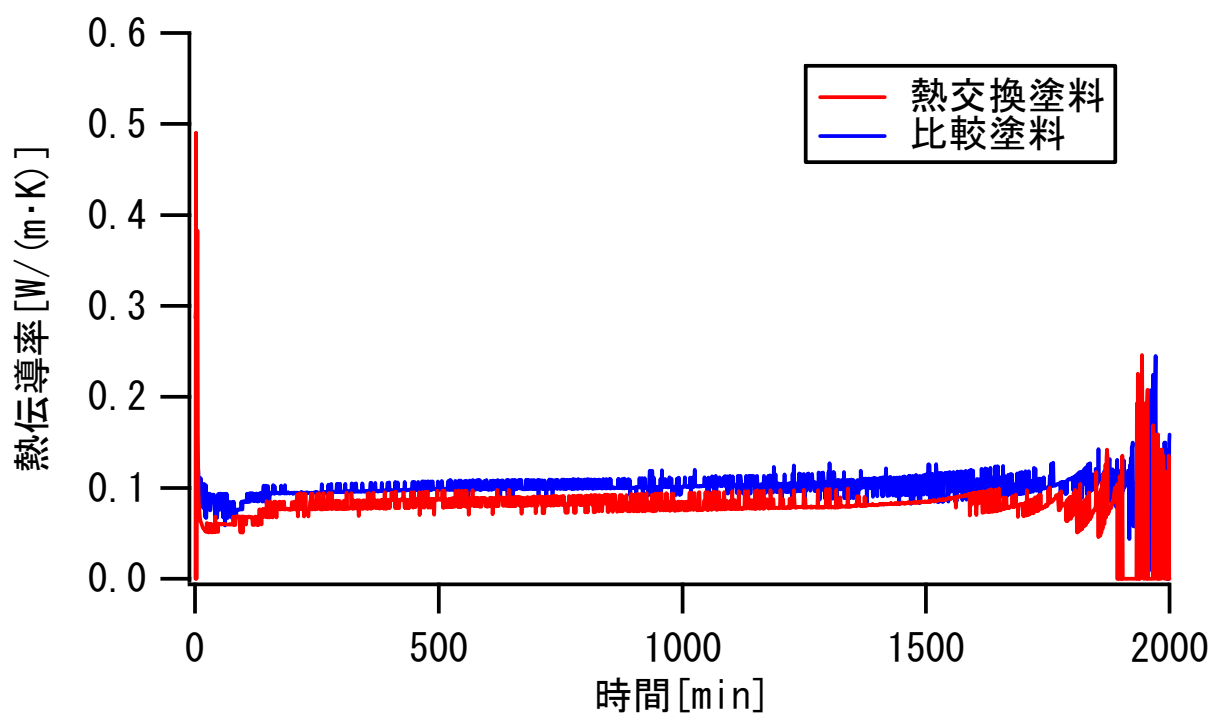


図 2.14 熱伝導率

第 3 章

ライト照射による 加熱実験

3.1 実験目的

第3章では高温での熱交換塗料の伝熱特性を調べるためにライトで加熱したときの熱伝導率を計測する。

3.2.実験装置

3.2.1 実験装置概要

図 3.1 のように前章の実験で使用した実験装置に熱源となるライトを取り付けたものを使用した。保温箱内部温度と試験片外側表面温度の差を利用し温度の流れを起こした。そのときの試験片両面の表面温度と熱流束からフーリエの法則により熱伝導率を求める。試験片表面温度は K 熱電対(素線径 $\phi 0.3[\text{mm}]$)、熱流束値は熱流束センサーによりサンプリング周期は $1[\text{min}]$ で測定した。なお熱流束センサー、熱電対、データロガー、熱伝導ペースト、断熱材は第2章と同様のためここでは省く。

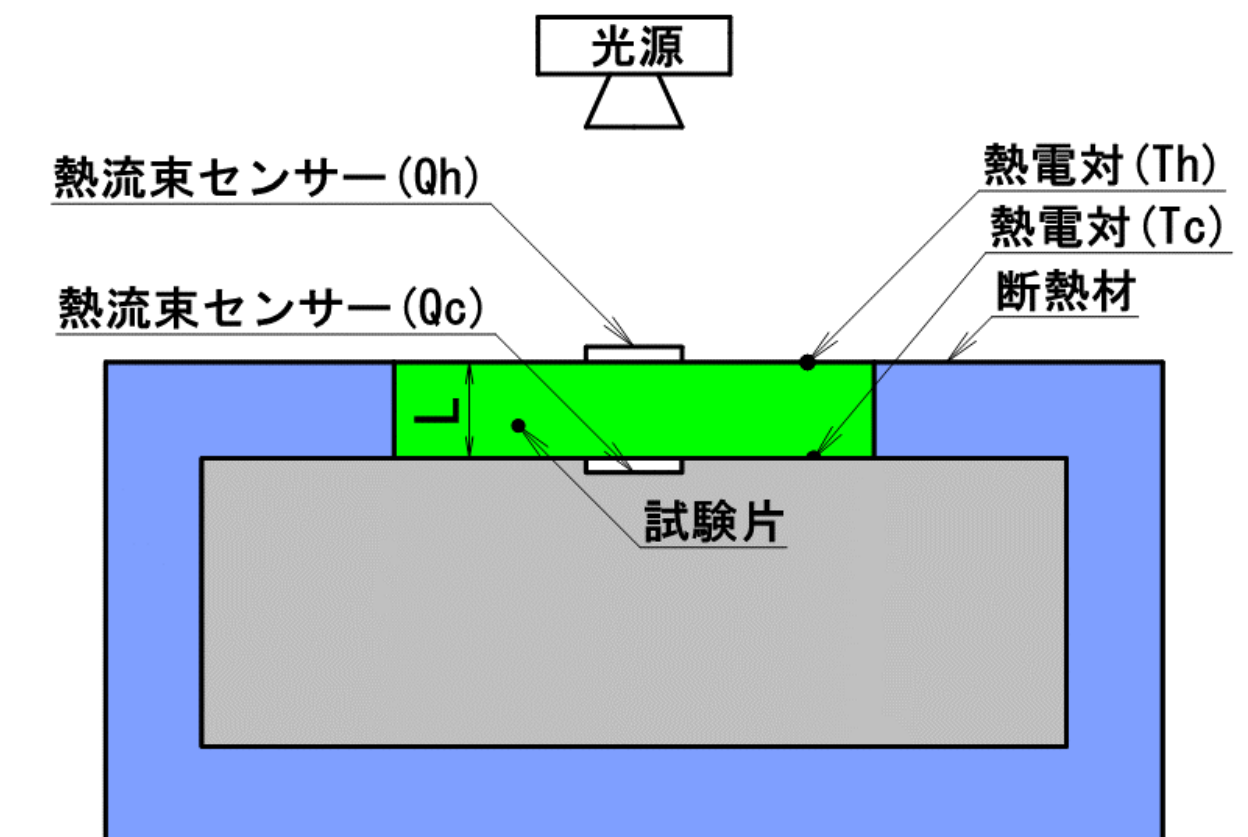


図 3.1 ライト照射による加熱実験装置

3.3 実験手順

以下の手順に従って実験を行う。

1. データロガーの電源を入れ熱流束センサー、熱電対の接続を確認する。
2. データロガーで計測を始める
3. 計測開始から 1 分後から試験片にライト照射を開始する。
4. 実験開始から 125 分後にライト照射を停止した。
5. 実験開始から 180 分後に計測を終了した。
6. 熱交換塗料、比較塗料各試験片を 3 枚作製し、3 回ずつ実験を行う。
7. 実験終了

3.4 実験結果

図 3.2 はライトで熱交換塗料、比較塗料試験片を加熱実験したときの高温側及び低温側試験片表面温度の時間変化を示す。実験開始から 20 分程度までライトの加熱により熱交換塗料、比較塗料の両試験片の高温側試験片温度が急激に上昇し、その後ライトを停止する 125 分(図 3.2 中の黒い線)まで、低温側へ抜ける熱量とヒーターにより与えられる熱量が安定し、試験片の温度上昇速度が定常状態となり徐々に高温側、低温側試験片表面温度が上昇していった。125 分でライト照射を停止すると両塗料ともに高温側試験片表面温度が急激に低下し、低温側試験片表面温度は 5 分ほど上昇を続けた後、低下し始める。高温側と低温側試験片表面温度の温度差に注目してみるとどの時間帯でも熱交換塗料のほう小さくなっていた。試験片のライト照射停止直前の最高温度を比べると高温側では熱交換塗料が 47.15°C 、比較塗料が 54°C 、低温側で熱交換塗料が 41.35°C 、比較塗料が 44.85°C となり高温側、低温側ともに比較塗料のほうが高い温度になった。

図 3.3 はライト照射による加熱実験より計測された各塗料の高温側、低温側試験片温度の差を示す。実験開始によりライト照射のため高温側試験片温度が急激に上昇するため、温度差も急激に上昇する。その後ライト照射を停止する 125 分まで緩やかに温度差は小さくなっていく。ライト照射を停止した後は、高温側試験片温度が大気により冷却され急激に温度差が小さくなり、保温箱内部温度は大気温度より高いため温度差が負の値になり、高温側と低温側が逆転し、熱の流れも逆転していることが分かる。

図 3.4 はライト照射による加熱実験より計測された熱交換塗料及び比較塗料の熱流束の結果を示す。高温側、低温側試験片表面温度の変化に伴い熱流束が変化しているのがわかる。実験開始後、数分程度で熱流束は急激に大きくなり、低温側へ抜ける熱量とヒーターにより与えられる熱量が安定的な 125 分程度までは熱流束はほぼ一定の値となっている。ライト照射停止後の 125 分から熱流束が急激に低下し負の値をとるのは、ライトで加熱している期間では熱の流れが加熱する側から保温箱内部側になっていたが、ライト停止後からは加熱していた側が大気で冷やされたため、熱の流れが逆転し、保温箱内部側から大気に接する外部側へと熱が流れたからである。熱流束センサーの性質上、加熱する側から保温箱側に熱が流れたとき熱流束センサーは正の値をとり、保温箱側から加熱する側へと熱が流れたとき熱流束センサーは負の値をとる。

図 3.5 はライト照射による加熱実験より計測された熱交換塗料及び比較塗料の試験片温度と熱流束結果から求められた熱伝導率の時間変化を示す。熱交換塗料及び比較塗料の熱伝導率は熱流束が安定する実験開始後 20 分程度から 125 分程度まではほぼ一定値となり、その後、ライト照射停止後 5 分間ほどの熱流束と試験片温度の急激な変化により熱伝導値も大きく変動した。その後は実験終了まで安定的に熱伝導率を計測できた。熱交換塗料と比較塗料の熱伝導率値について注目すると実験開始からライト照射停止する 125 分ほどまではほぼ同じ値を示したが、熱の流れが逆転したライト照射停止後からは熱交換塗料の熱伝導率の値のほうがわずかに大きい値を示した。また、熱の流れの逆転

後、熱交換塗料および比較塗料の熱伝導率は低下した。この結果から、高温側と低温側の温度差あるいは熱の流れの方向により熱伝導率が変化することが推測される。

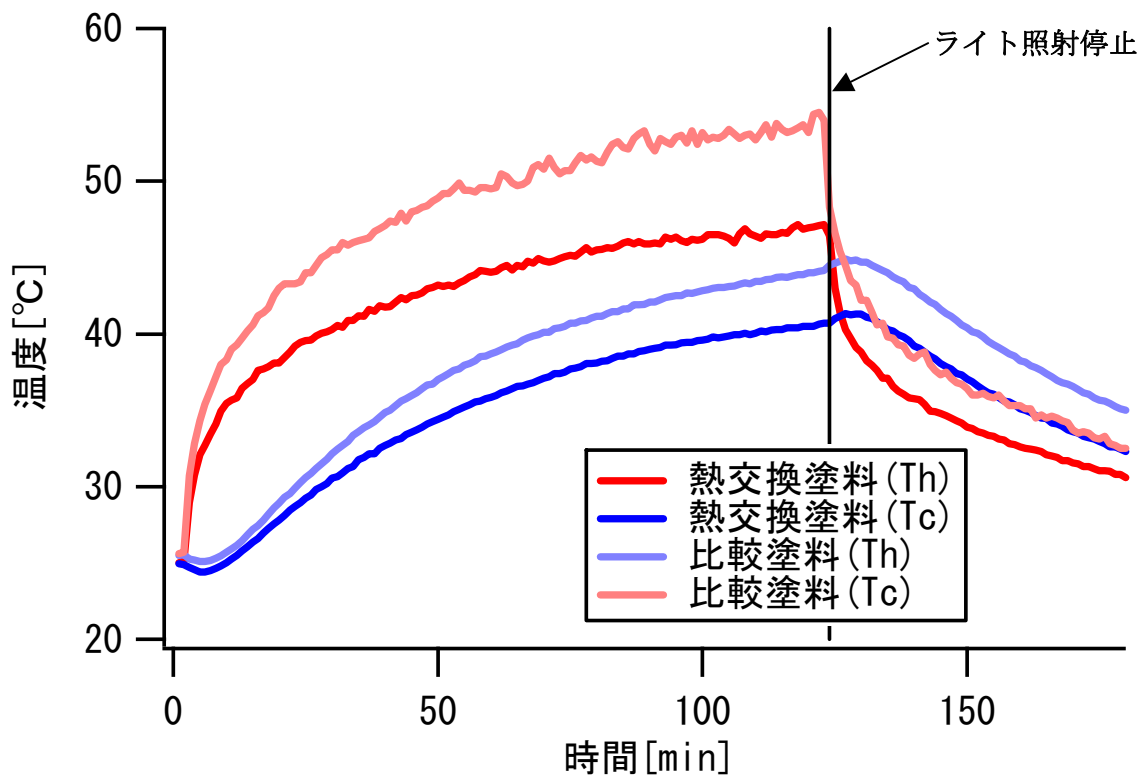


図 3.2 試験片温度

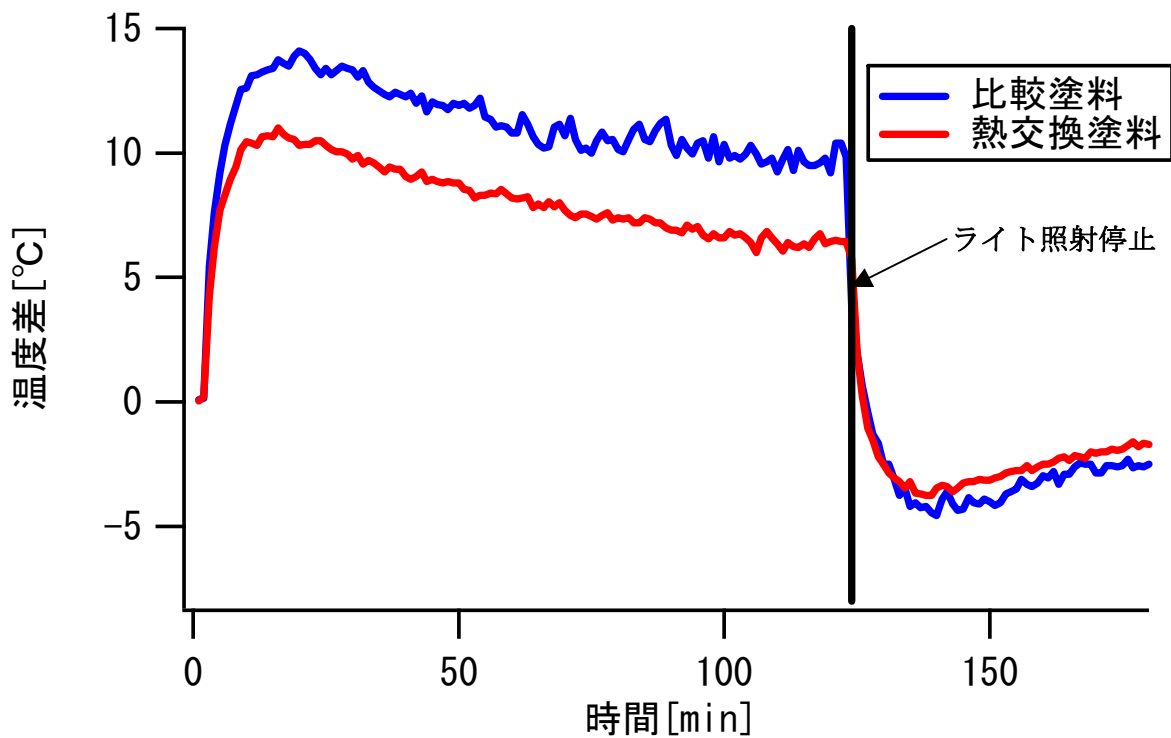


図 3.3 試験片温度差

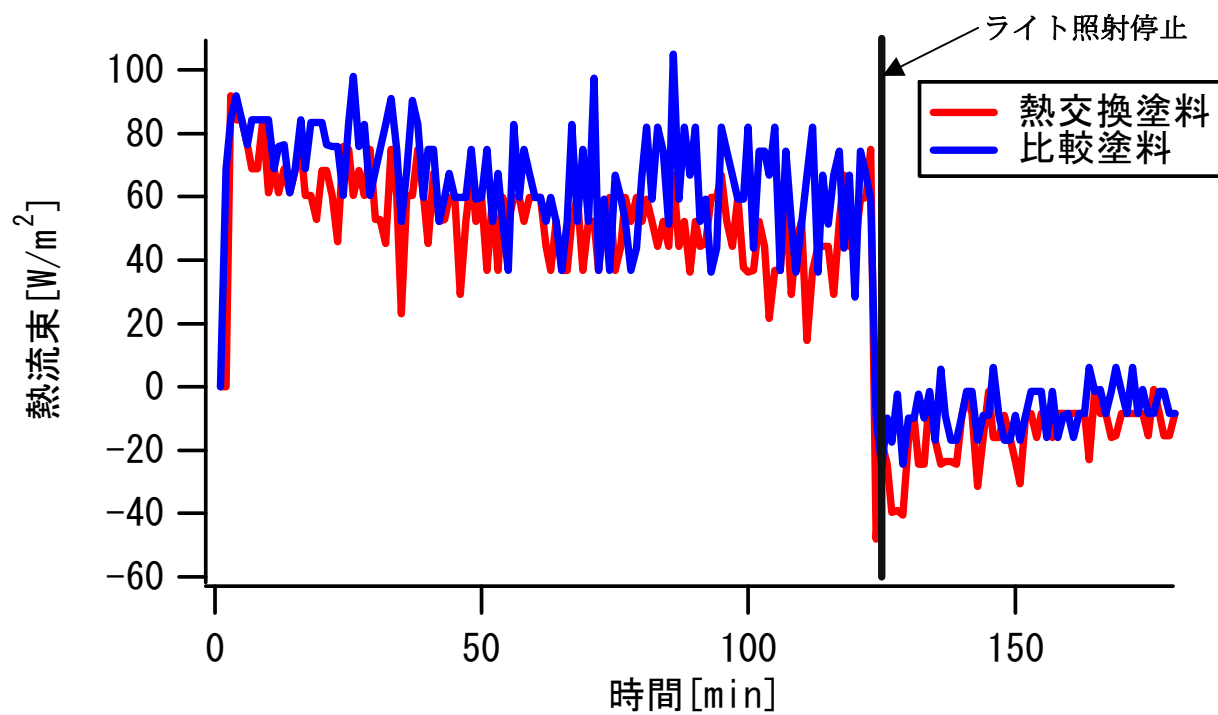


図 3.4 熱流束

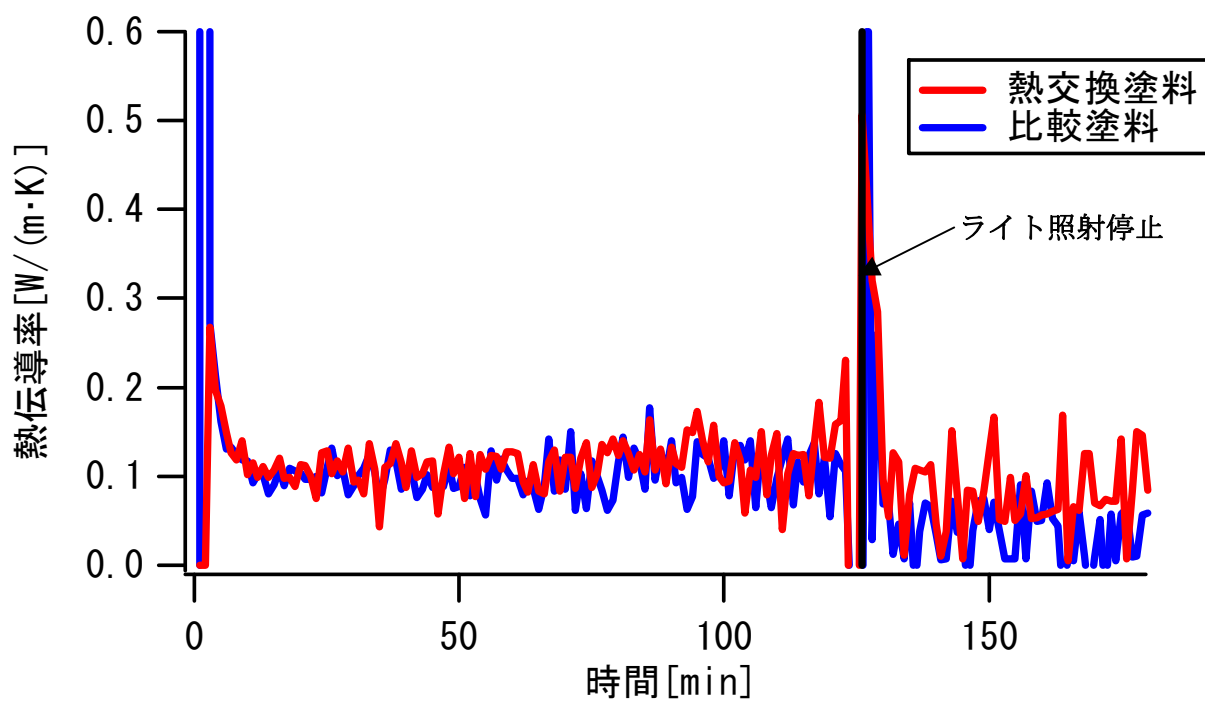


図 3.5 熱伝導率

第 4 章

ペルチェ素子を使用した 冷却実験

4.1 実験目的

第3章で行ったライト照射の加熱実験により塗料試験片の表と裏の温度差あるいは熱の流れの方向により熱伝導率が変化することが推測された。そこで本実験ではペルチェ素子を用いて試験片の表と裏の温度差を制御して冷却実験を行い熱交換塗料と比較塗料の温度特性を評価する。

冷却にペルチェ素子を使用することにより電流による冷却の制御を行い 3.0A～1.0Aの範囲で温度を変化させ実験を行う。

4.2 実験装置

4.2.1 実験装置概要

第2章での実験では、低温下の熱交換塗料の伝熱特性を調べるために、保温箱にドライアイスを入れて実験を行った。この実験では、保温箱内部に温度のムラができ、箱内の温度制御ができない。そこで本実験では、ペルチェ素子を使用して、温度制御し実験を行う。図4.1に本実験に使用した実験装置では冷却にペルチェ素子を使用し電圧、電流により冷却を制御できるようになり、第2章で使用した実験装置では試験片の冷却にドライアイスで冷却された空気を利用していた。保温箱内部の空気温度にムラがあり試験片の冷却に差が生じてしまっていたが今回の試験装置では冷却部と試験片を密着させることにより冷却のムラをなくした。なお熱流束センサー、データロガー、熱電対、熱伝導ペースト、断熱材は第2章と同じものを使用しているため説明は省く。

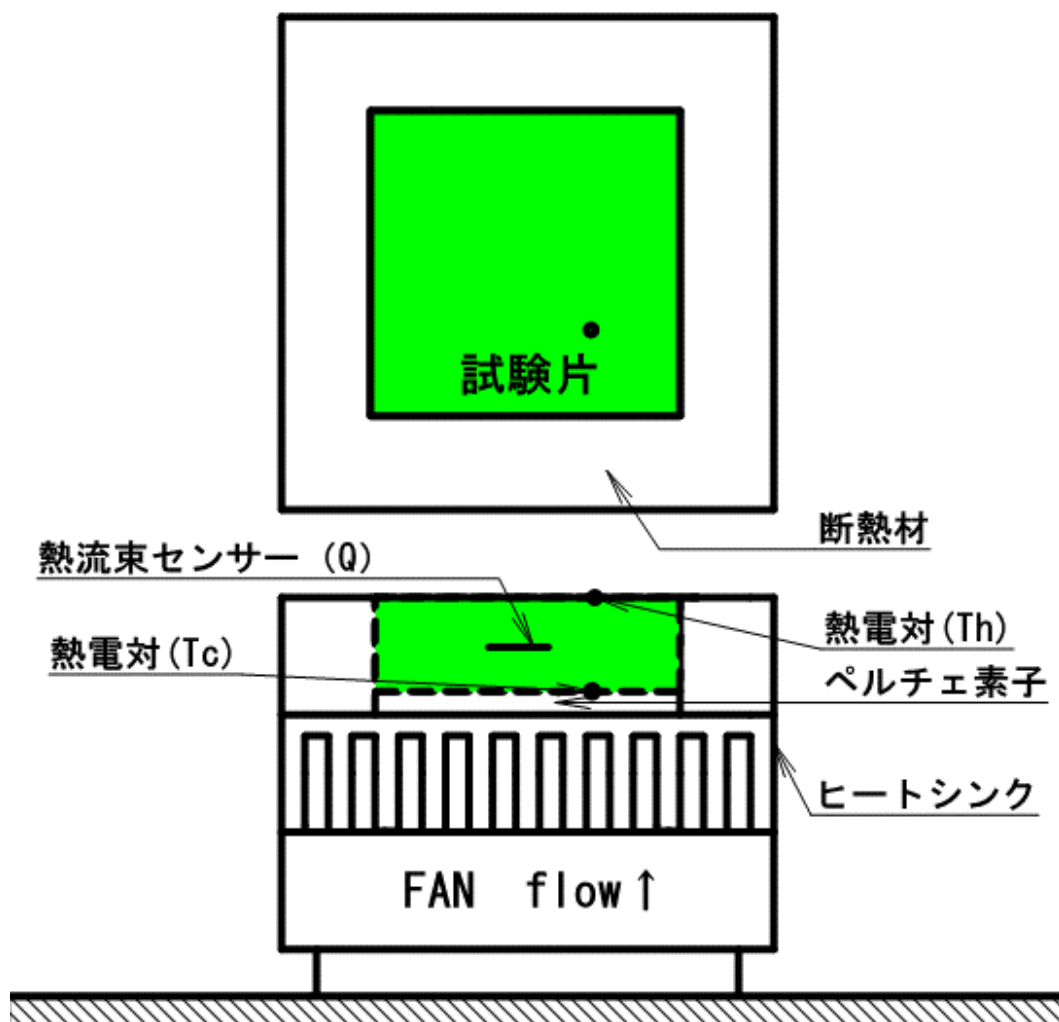
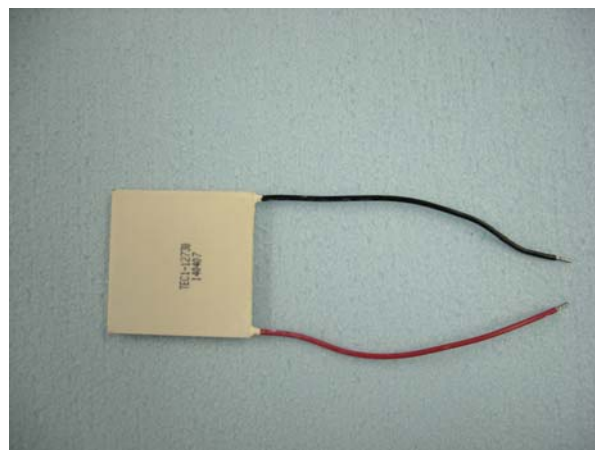


図 4.1 ペルチェ素子を使用した冷却実験装置

4.2.2 冷却部

(a)ペルチェ素子

本実験での冷却方法には温度の変化による塗料の特性の変化を調べるため、電圧で温度を制御できるように熱伝素子の一種である図 4.2 のペルチェ素子を使用した。ペルチェ素子の仕様は表 4.1 に示す。



4.2 ペルチェ素子

表 4.1 ペルチェ素子

形式	ペルチェ素子 6A タイプ
大きさ	40×40×4.1mm
最大電流	6A
最大使用電流	15.4A
最大吸熱量	53.3W
最大温度差	68℃
抵抗	約 1.98Ω

(b)ファン

ヒートシンクの熱を効率よく発散させるために図 4.3 のファンを使用した。ファンの仕様は表 4.2 に示す。

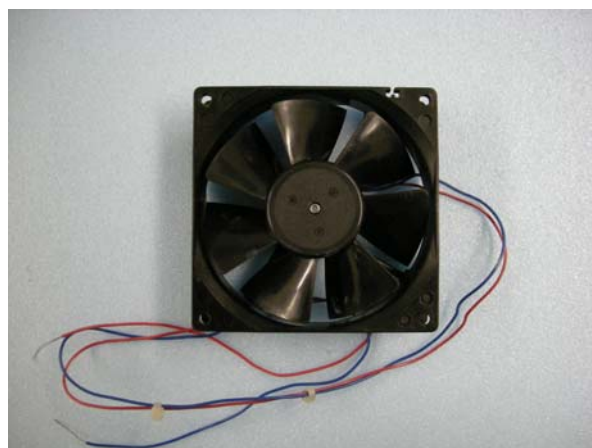


図 4.3 ファン

表 4.2 ファン

形式	PANAFLO 製 FBK-09A12M
外寸	92×92×25
電力	0.96W
エアーフロウ	35.3CFM

(c)ヒートシンク

ペルチェ素子は電気を流すと片面から熱を吸収し温度を冷やし、反対側の面から熱を放出する特性がある。その特性を利用し試験片を冷却する。熱を放出するために図 4.4 のヒートシンクを使用した。ヒートシンクの仕様を表 4.3 に示す。



図 4.4 ヒートシンク

表 4.3 ヒートシンク

形式	ASK25100WYS ヒートシンク
外寸	100×100×25mm
材質	アルミ

4.3 実験手順

以下の手順に従って実験を行う。

1. データロガーの電源を入れ熱流束センサー、熱電対の接続を確認する。
2. データロガーで計測を始める
3. 計測開始から 1 分後からペルチェ素子に電力を投入し冷却を開始する。
4. ペルチェ素子に電力を投入してから 1 時間後に電力の供給を停止。
5. 電力の供給停止から 5 分後にデータロガーの計測を終了。
6. 熱交換塗料、比較塗料各試験片を作製し、3 回ずつ実験を行う。
7. 実験終了

4.4 熱伝導率算出方法

基本的な考え方は第 2 章の 2.5 節に示した熱伝導率算出方法と同じだが図 4.1 も実験装置図にあるように熱流束センサーを試験片の中心になったため式に少し変更する必要がある。図 4.5 にペルチェ素子を使用した冷却実験使用した試験片の断面を模式的に示す。熱伝導率は以下の式で求まる。

$$\lambda = \frac{L \cdot Q}{(T_h - T_c) \cdot 2} \quad (4.1)$$

λ : 熱伝導率[W/(m · K)]

Q : 熱流量[W/m²]

L : 試験片厚さ[m]

T_h : 高温側試験片表面温度(°C)

T_c : 低温側試験片表面温度(°C)

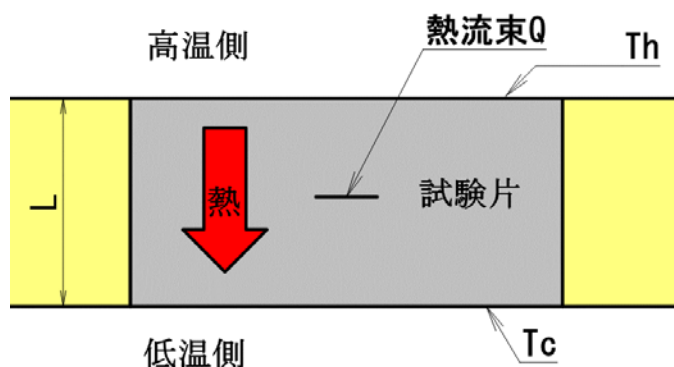


図 4.5 第 4 章で使した試験片の断面模式図

4.5 実験結果

第 4 章ではペルチェ素子を使用した冷却実験をペルチェ素子に流す電流を 3.0A から 1.0A まで 0.25A 刻みで変化させ行った。

図 4.6 にペルチェ素子を使用した冷却実験における各電流での熱交換塗料と比較塗料の高温側及び低温側試験片表面温度の時間変化を示す。ペルチェ素子に電流を流し始めると、グラフ上の低温側試験片表面温度を表す青い線が急激に低下していることがわかる。電源投入後から 100 秒ほど送れてグラフ上の高温側試験片表面温度を表す赤い線が緩やかに低下している。低温側試験片表面温度は計測するための熱電対が試験片とペルチェ素子の間にあるため、電流の強さによって決まるので熱交換塗料と比較塗料で差はない。第 2 章のドライアイスを使用した実験と違い冷却温度が一定のため急激な変化は見られないが、高温側試験片表面温度を熱交換塗料と比較塗料で比べると 400 秒から 1200 秒の間で熱交換塗料の温度低下が大きいようにみえる。

図 4.8 はペルチェ素子を使用した冷却実験における各電流での熱交換塗料と比較塗料の高温側、低温側試験片温度差の結果を示す。ここでの温度差は図 4.7 の矢印にあるように高温側試験片温度と低温側試験片温度の温度差である。計測開始から 1 分後にペルチェ素子へ電流を流し始めると低温側試験片表面温度が急激に低下するために温度差も急激に低下し、この時温度差は最大値をとった。温度差について熱交換塗料と比較塗料を比べると熱交換塗料の方が温度差が小さくなった。

図 4.9 はペルチェ素子を使用した冷却実験における各電流での熱交換塗料と比較塗料の降下温度を示す。ここで示す温度降下とは図 4.10 の矢印にあるように高温側試験片温度の実験開始温度と各時間の高温側試験片温度の差である。実験開始から 400 秒ほどまでは変化があまりない。これは低温側から高温側への冷却効果が伝わるのに時間がかかるためである。その後、低温側からの冷却と高温側の大気からの温度吸収が安定的となり緩やかに高温側試験片温度が下がっていく。すべての電流で熱交換塗料の降下温度が大きい結果となった。

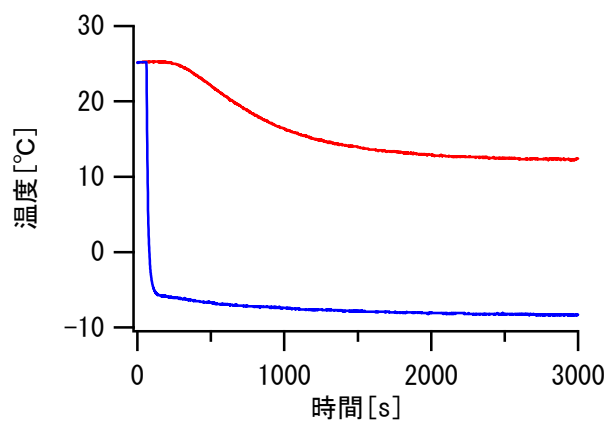
図 4.11 はペルチェ素子を使用した冷却実験における各電流での熱交換塗料と比較塗料の熱流束の結果である。ペルチェ素子による冷却による高温側、低温側試験片表面温度の変化に伴い熱流速も変化していることがわかる。実験開始後から 400 秒程度まで熱流速は急激に上昇し、その後の熱流速は安定的な値をとり続ける、この時高温側試験片温度は緩やかに温度降下を続けている。全体を通して熱交換塗料と比較塗料比べると熱交換塗料の熱流束の方が小さい値を示す結果となった。最大値で熱交換塗料が $45.9[\text{W}/\text{m}^2]$ 、比較塗料が $76.6[\text{W}/\text{m}^2]$ となった。

熱流束の結果が不規則な波形をしているのは熱流束センサーの出力電圧が小さくデータロガーの分解能に近い値で計測したためと思われる。

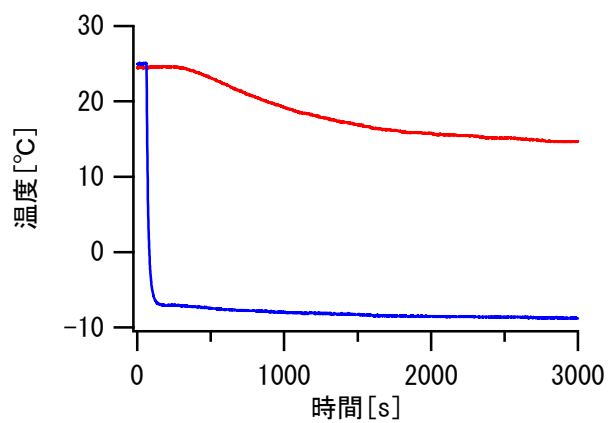
図 4.12 はペルチェ素子を使用した冷却実験における各電流での熱交換塗料と比較塗

料の高温側、低温側試験片温度と熱流束の結果から求められた熱伝導率の結果である。熱伝導率は熱流速値等から式で求められるため熱流束の波形に似ており、実験開始から400秒までの間に急激に上昇し、その後熱流束や試験片が安定的になるにつれ熱伝導率も安定した値をとる。熱伝導率の値を熱交換塗料と比較塗料とで比べると若干比較塗料のほうが大きい値をとることがわかる。

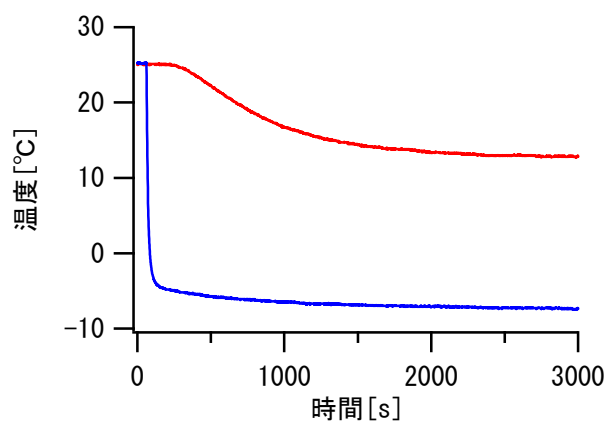
熱伝導率の結果が不規則な波形をしているのは不規則な波形を示す熱流束を用いて計算されるためである。



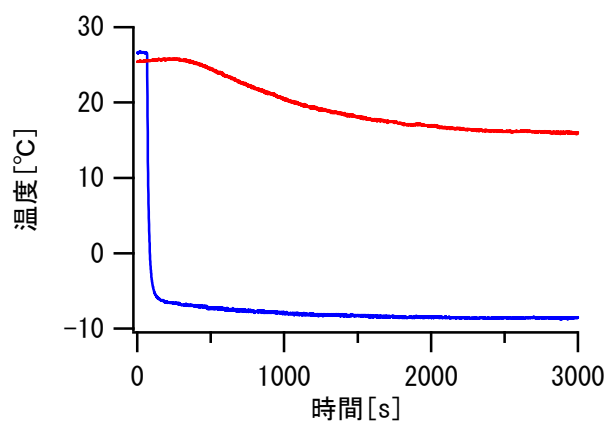
(a) 熱交換塗料 3.0A



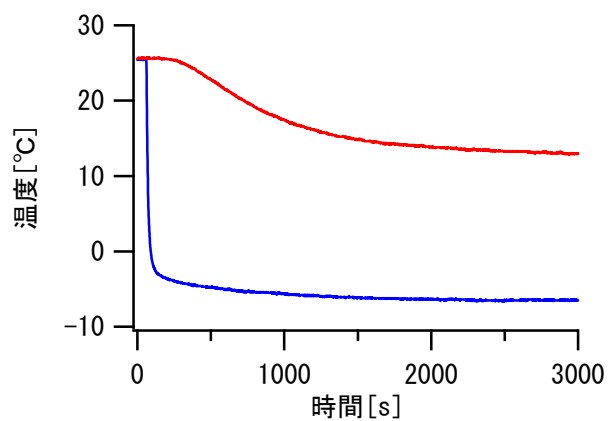
(b) 比較塗料 3.0A



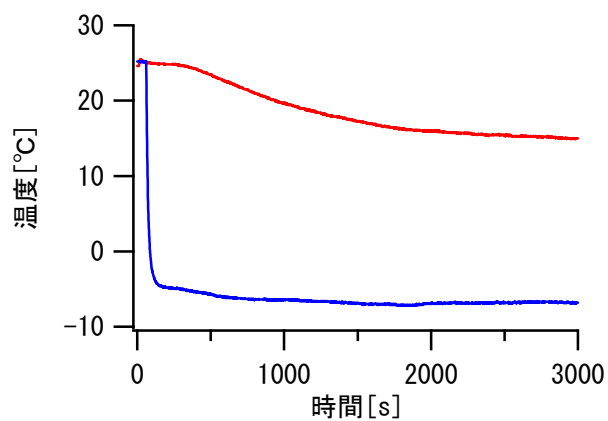
(c) 熱交換塗料 2.75A



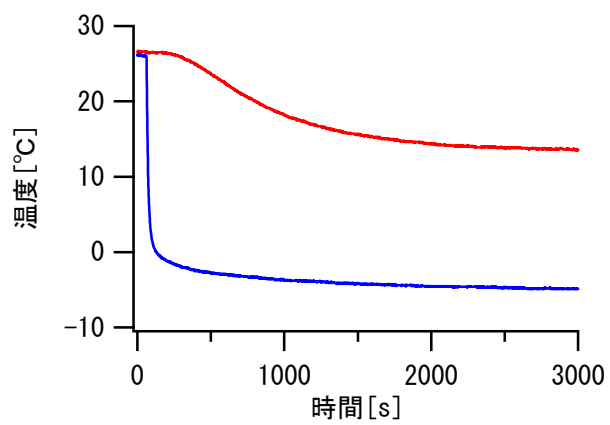
(d) 比較塗料 2.75A



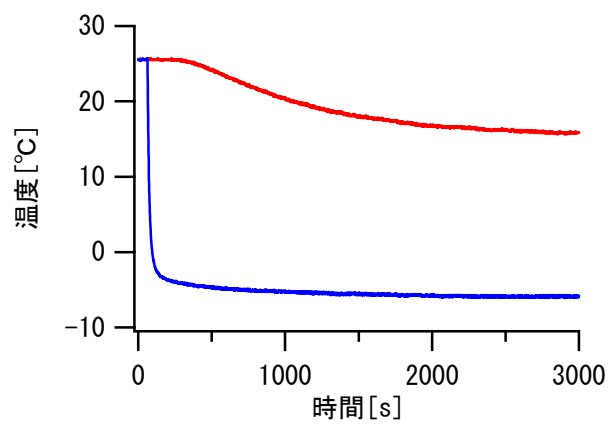
(e) 熱交換塗料 2.5A



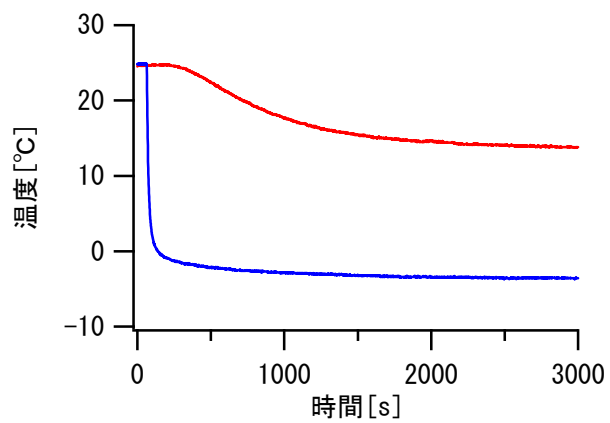
(f) 比較塗料 2.5A



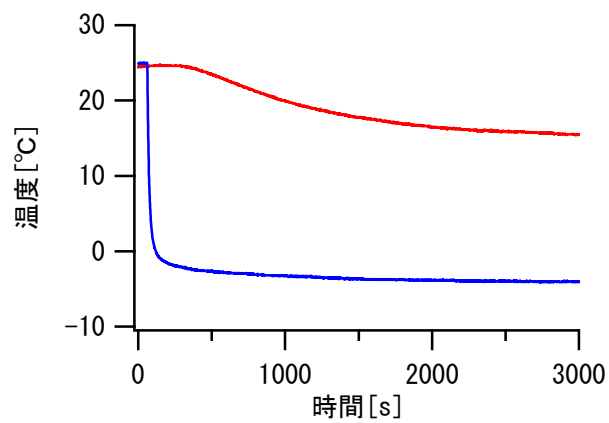
(g) 熱交換塗料 2.25A



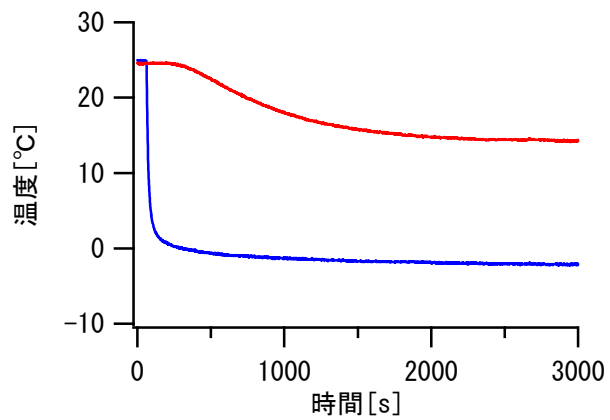
(h) 比較塗料 2.25A



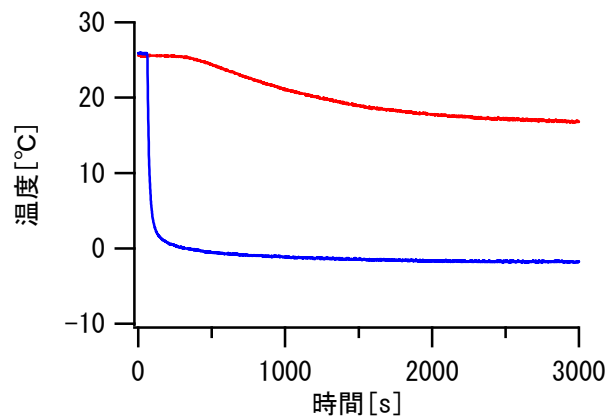
(i) 熱交換塗料 2.0A



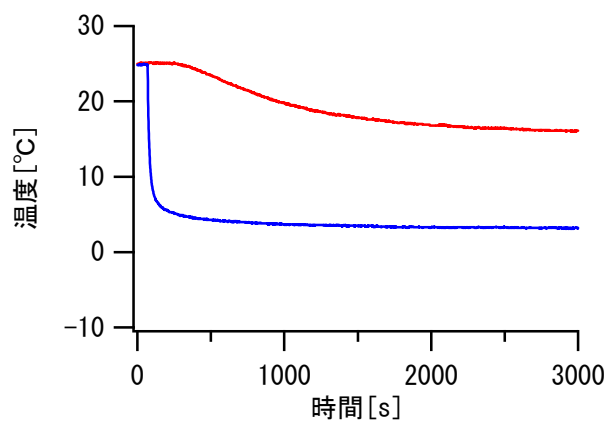
(j) 比較塗料 2.0A



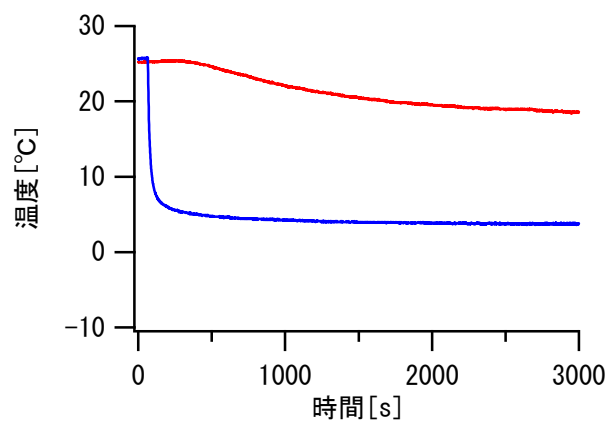
(k) 熱交換塗料 1.75A



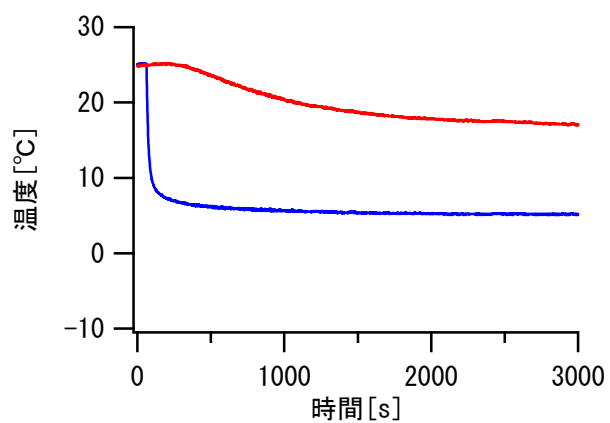
(l) 比較塗料 1.75A



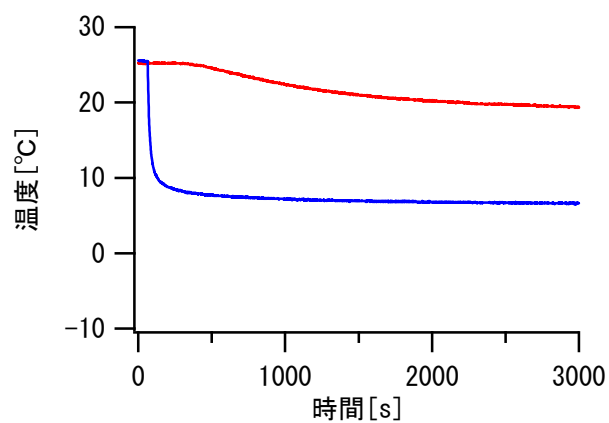
(m) 熱交換塗料 1.25A



(n) 比較塗料 1.25A



(o) 熱交換塗料 1.0A



(p) 比較塗料 1.0A

図 4.6 試験片温度結果

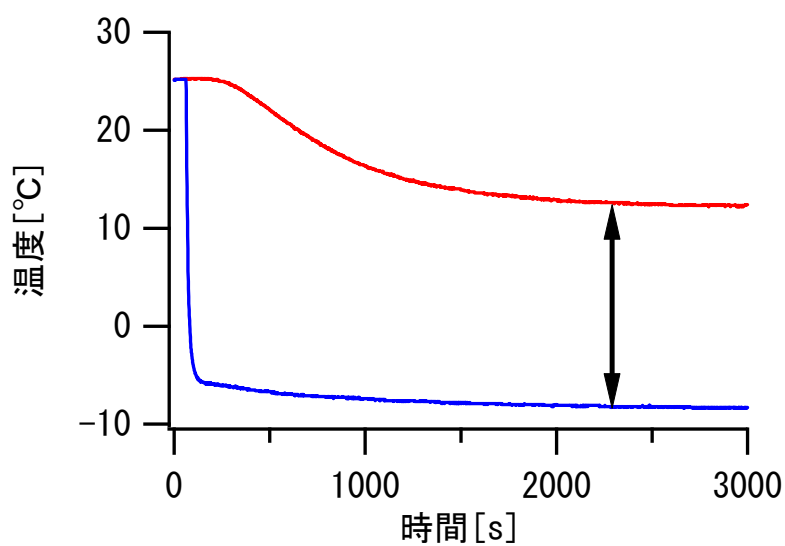
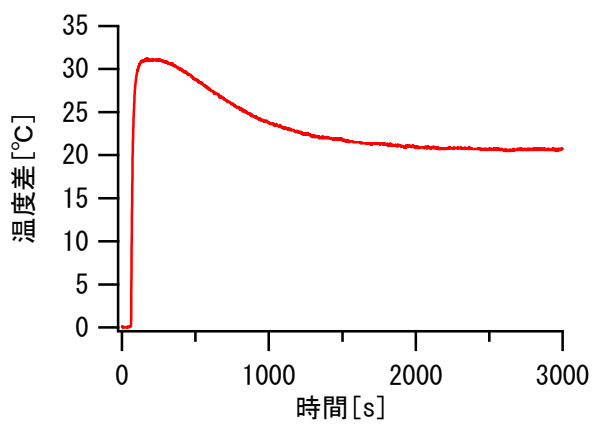
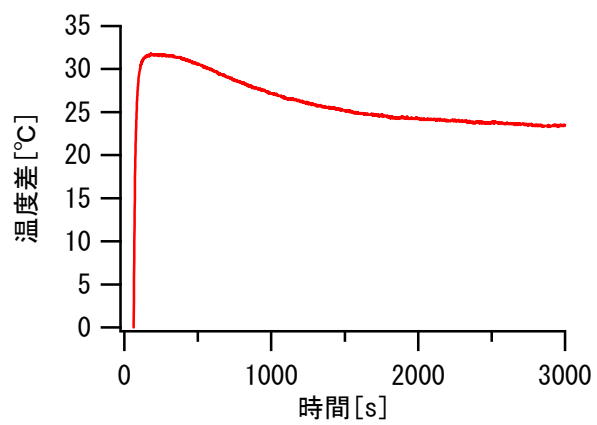


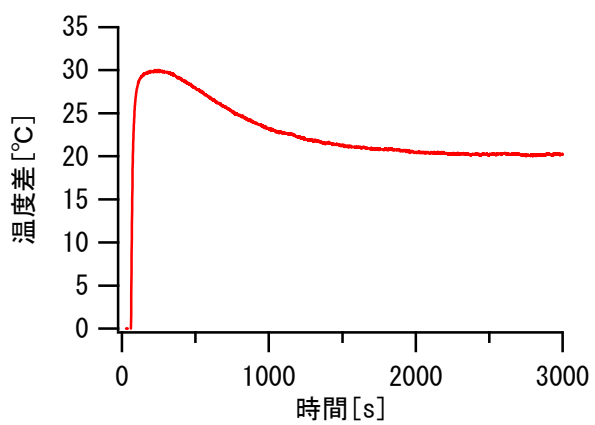
図 4.7 温度差説明図



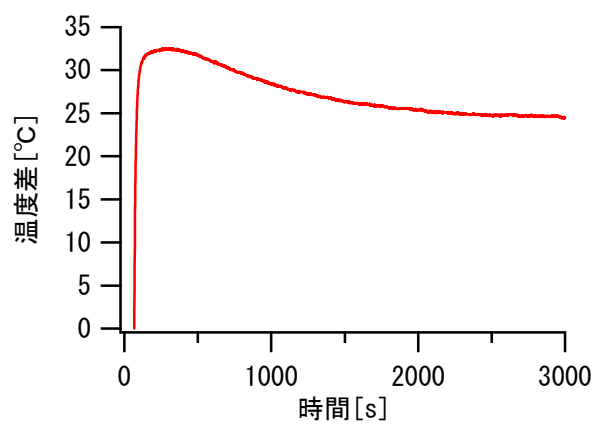
(a) 熱交換塗料 3.0A



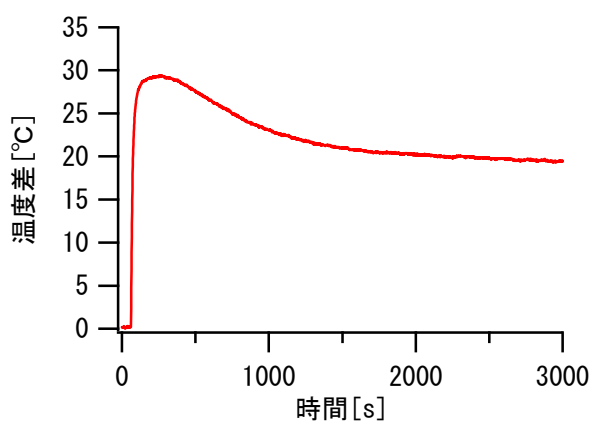
(b) 比較塗料 3.0A



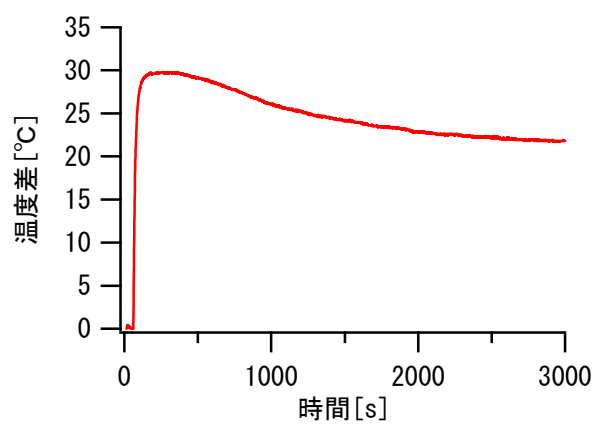
(c) 熱交換塗料 2.75A



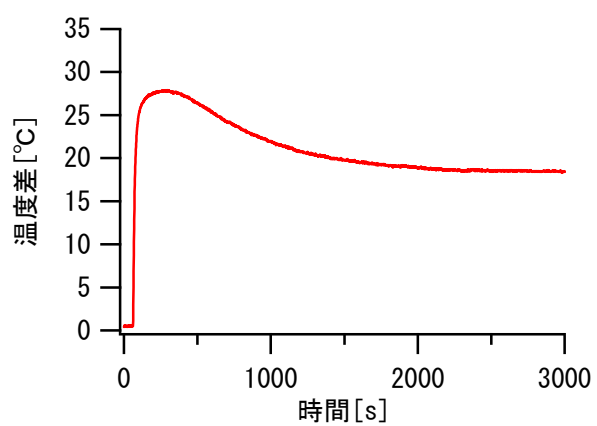
(d) 比較塗料 2.75A



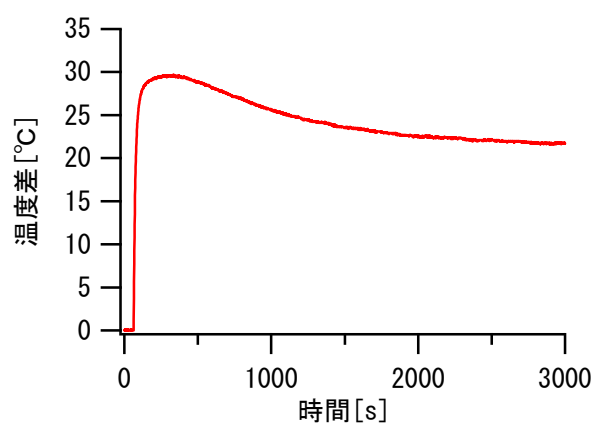
(e) 熱交換塗料 2.5A



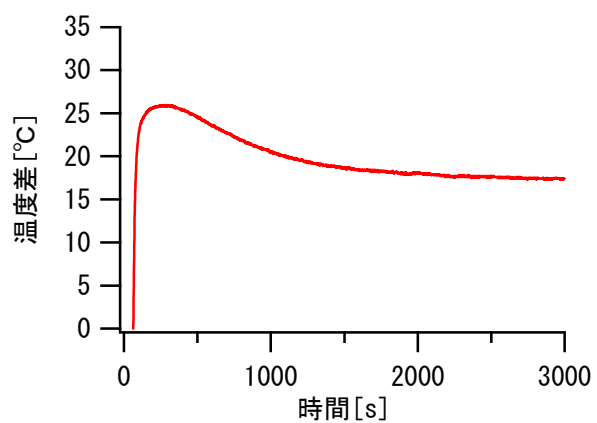
(f) 比較塗料 2.5A



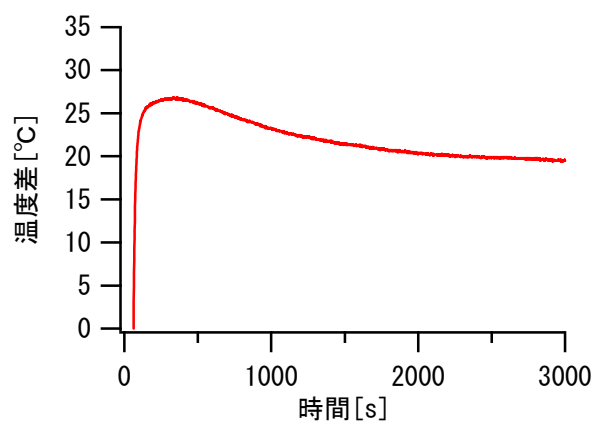
(g) 熱交換塗料 2.25A



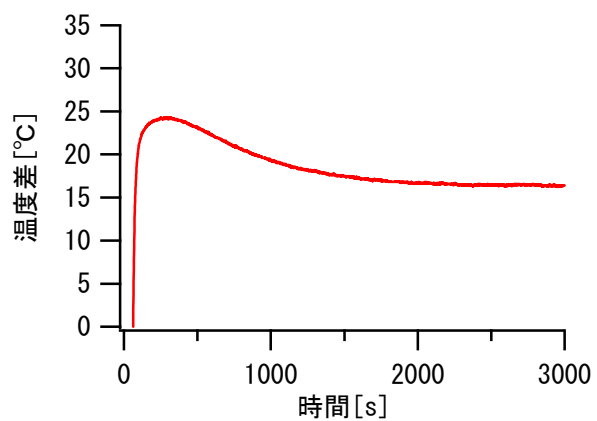
(h) 比較塗料 2.25A



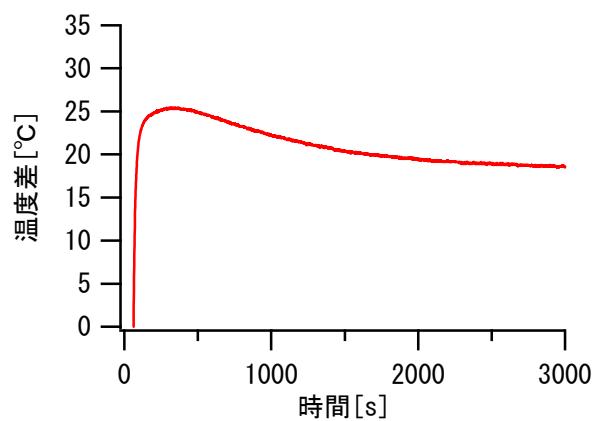
(i) 熱交換塗料 2.0A



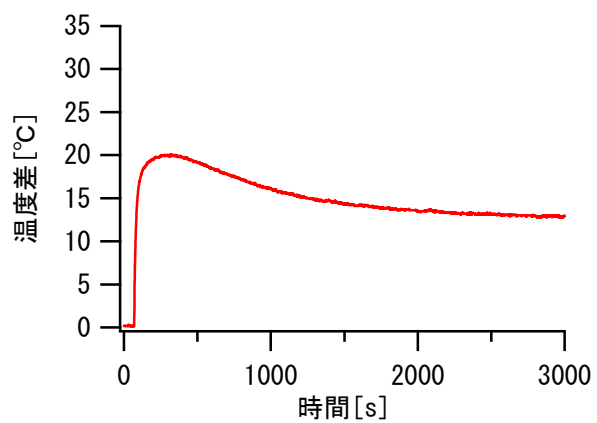
(j) 比較塗料 2.0A



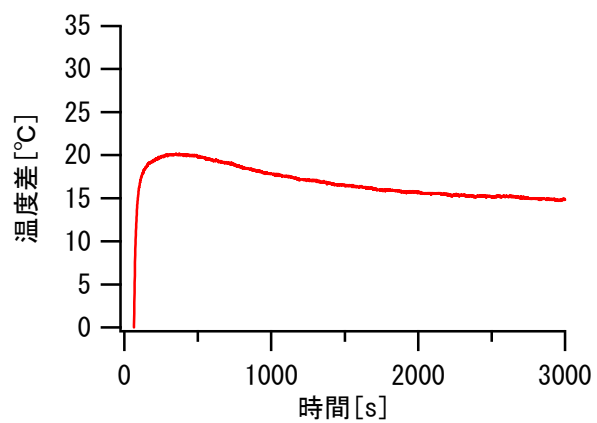
(k) 熱交換塗料 1.75A



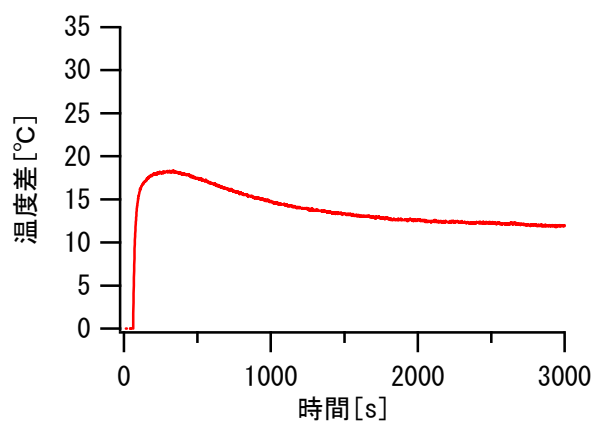
(l) 比較塗料 1.75A



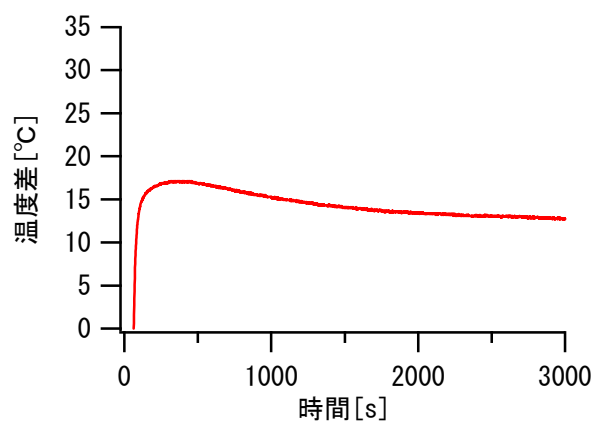
(m) 熱交換塗料 1.25A



(n) 比較塗料 1.25A

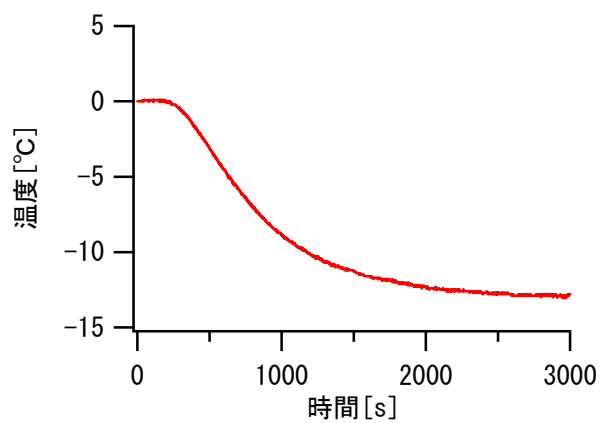


(o) 熱交換塗料 1.0A

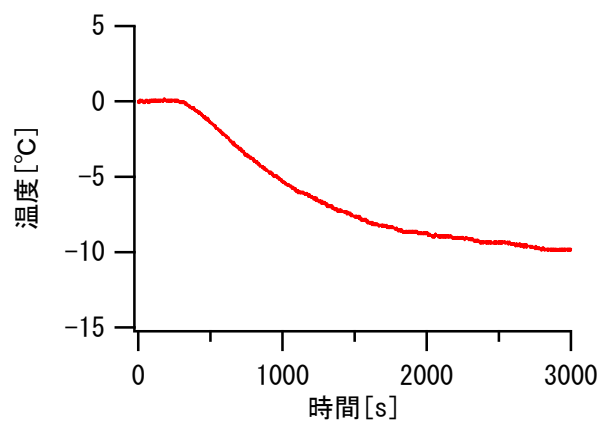


(p) 比較塗料 1.0A

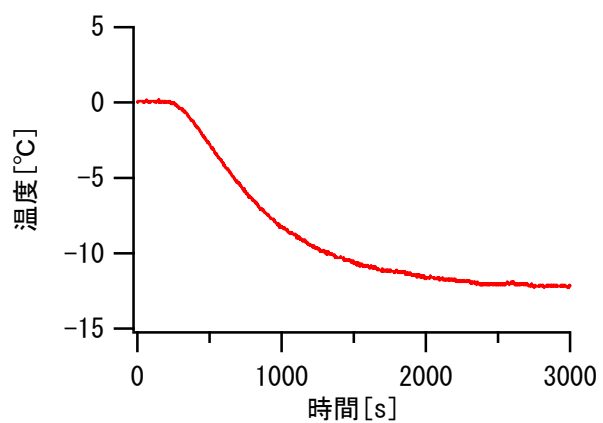
図 4.8 高温側試験片温度と低温側試験片温度の温度差



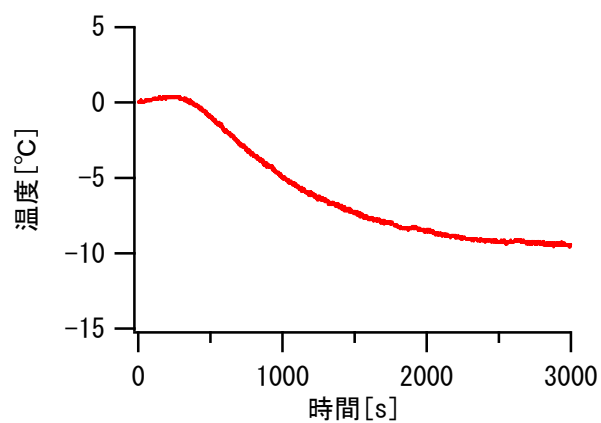
(a) 熱交換塗料 3.0A



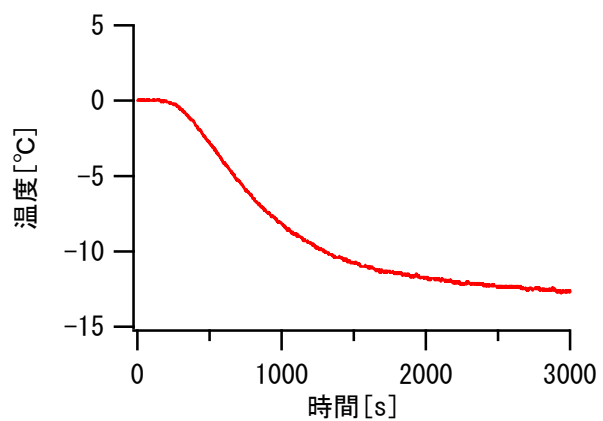
(b) 比較塗料 3.0A



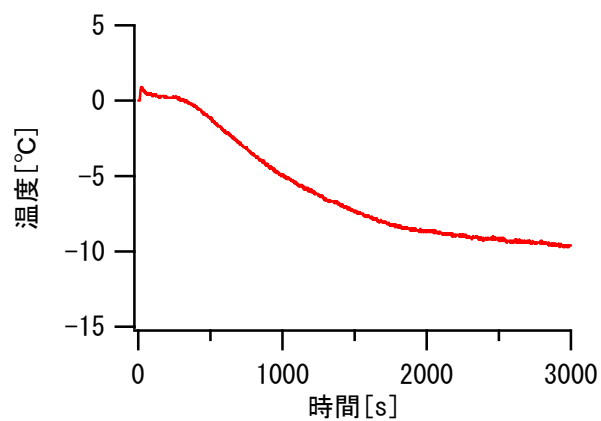
(c) 熱交換塗料 2.75A



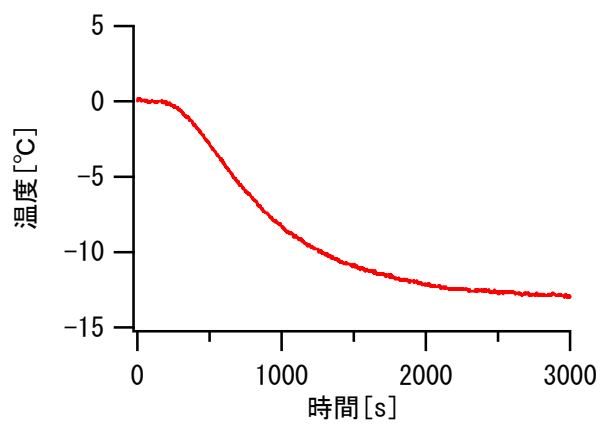
(d) 比較塗料 2.75A



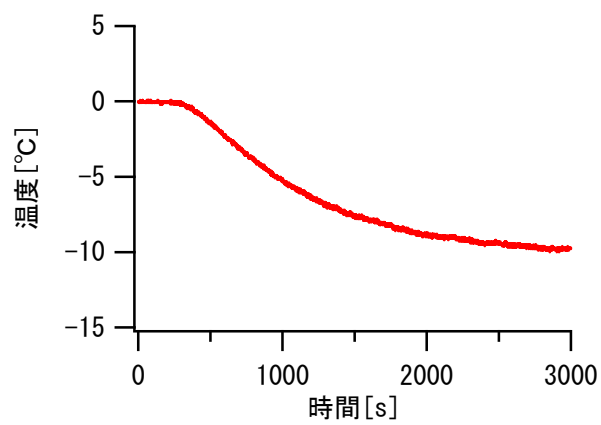
(e) 熱交換塗料 2.5A



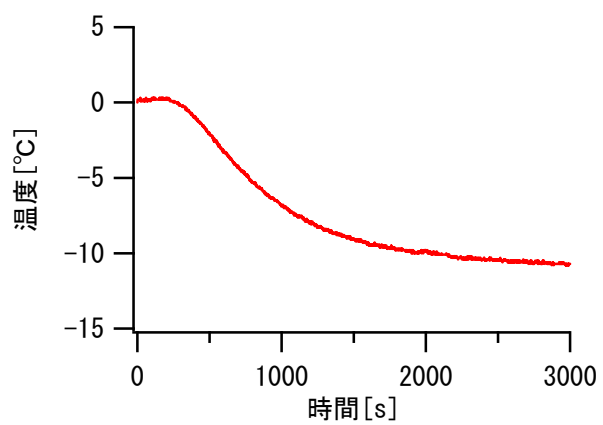
(f) 比較塗料 2.5A



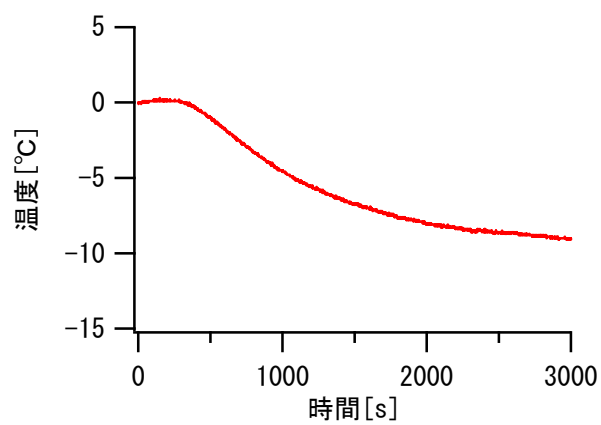
(g) 熱交換塗料 2.25A



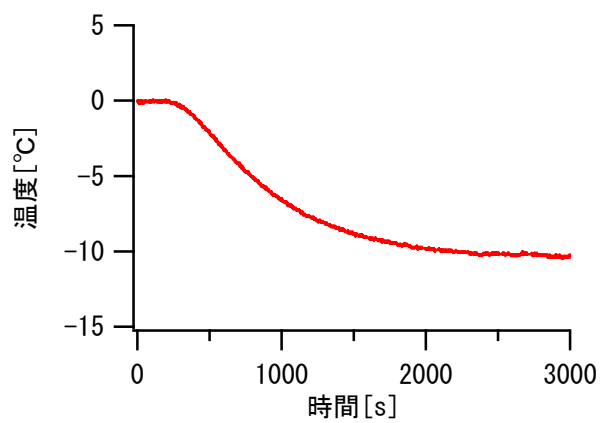
(h) 比較塗料 2.25A



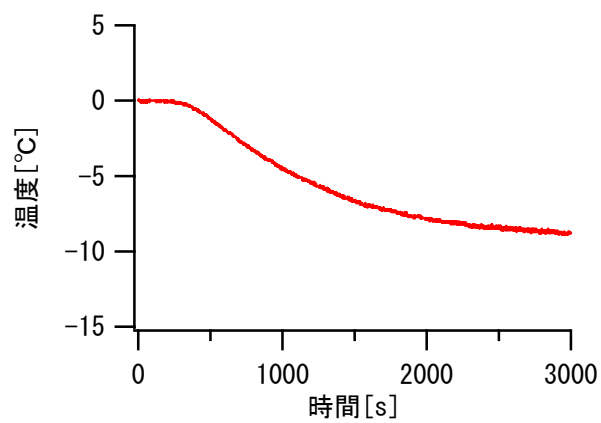
(i) 熱交換塗料 2.0A



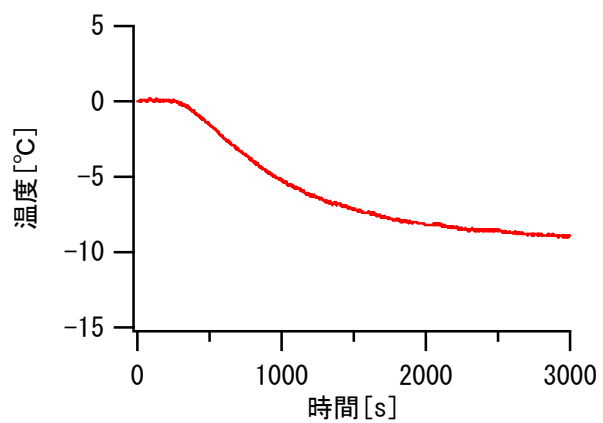
(j) 比較塗料 2.0A



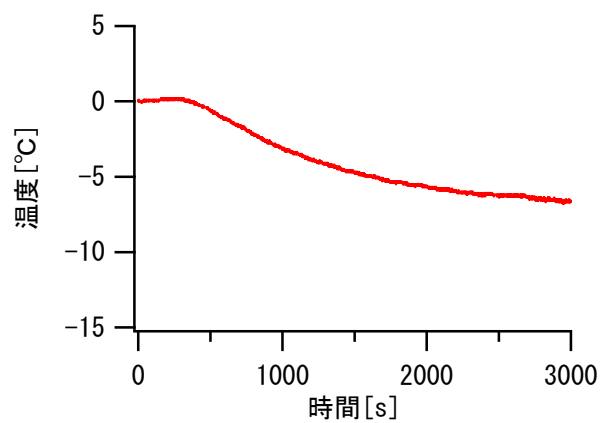
(k) 熱交換塗料 1.75A



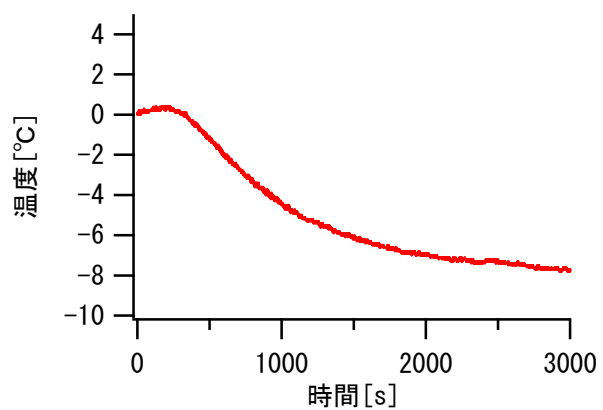
(l) 比較塗料 1.75A



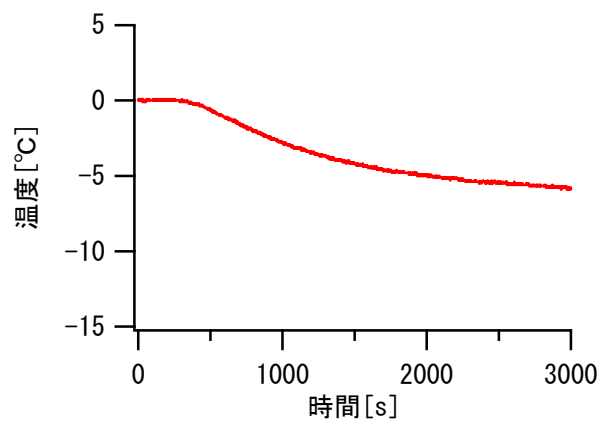
(m) 熱交換塗料 1.25A



(n) 比較塗料 1.25A



(o) 熱交換塗料 1.0A



(p) 比較塗料 1.0A

図 4.9 温度降下

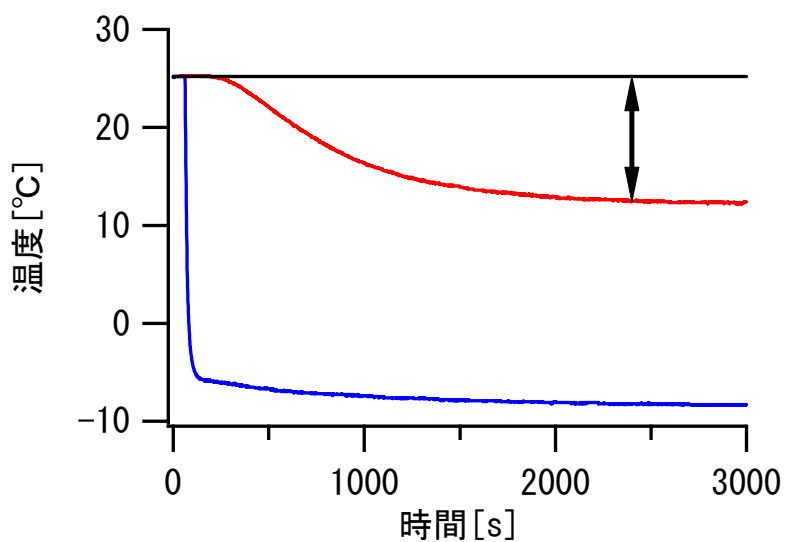
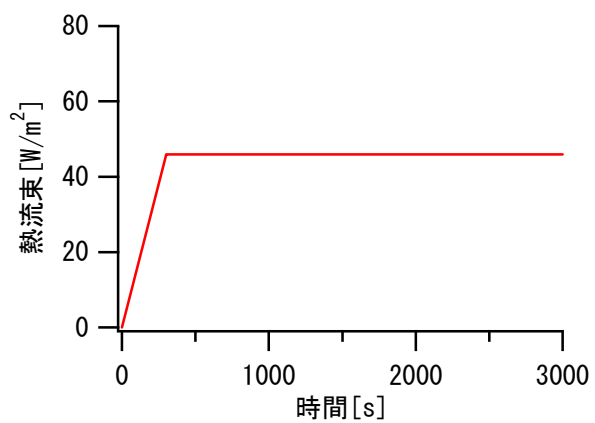
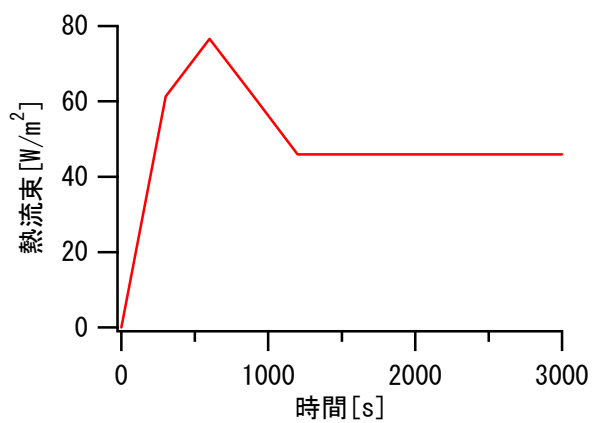


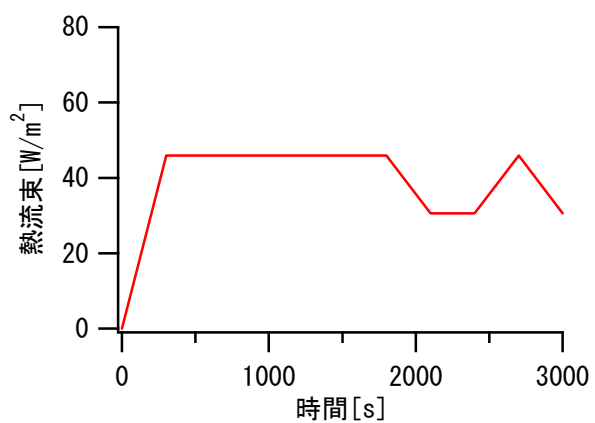
図 4.10 温度降下説明図



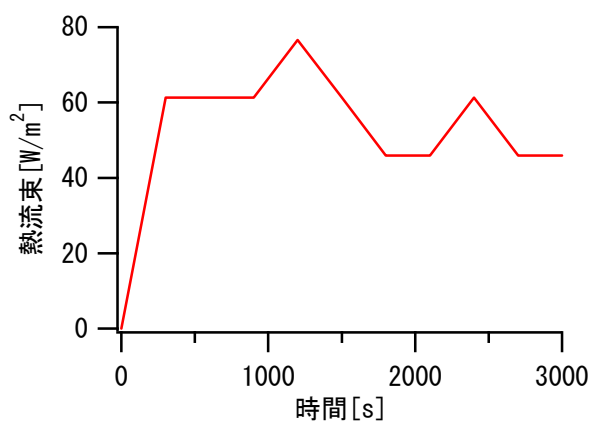
(a) 熱交換塗料 3.0A



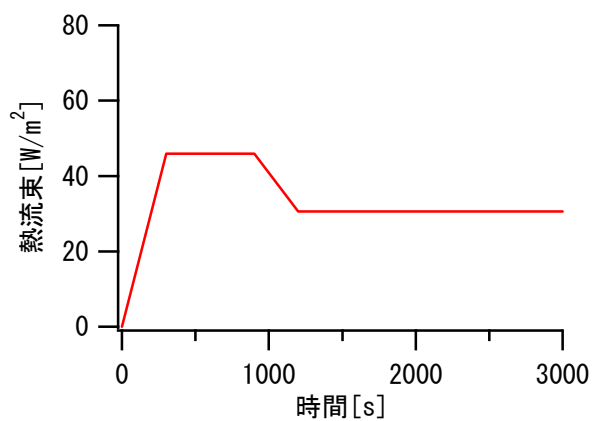
(b) 比較塗料 3.0A



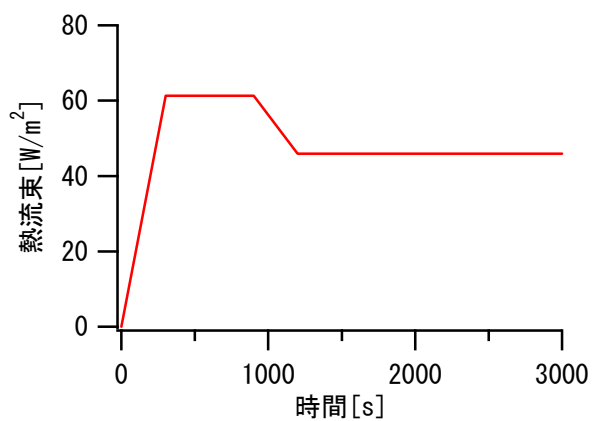
(c) 熱交換塗料 2.75A



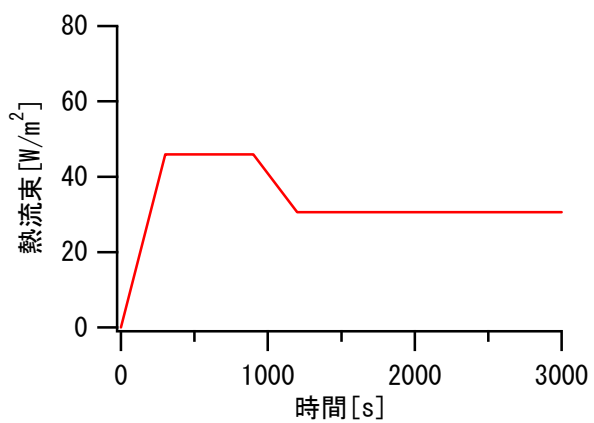
(d) 比較塗料 2.75A



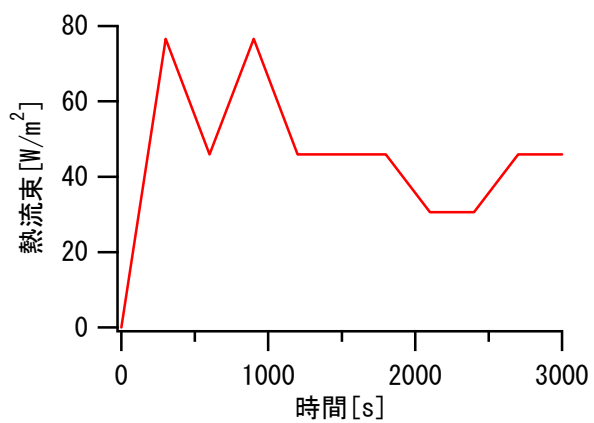
(e) 熱交換塗料 2.5A



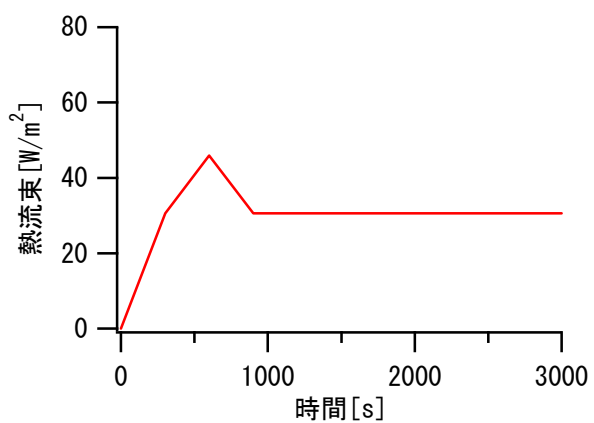
(f) 比較塗料 2.5A



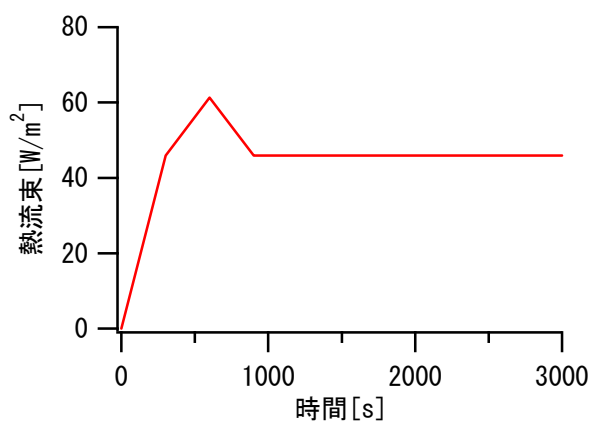
(g) 熱交換塗料 2.25A



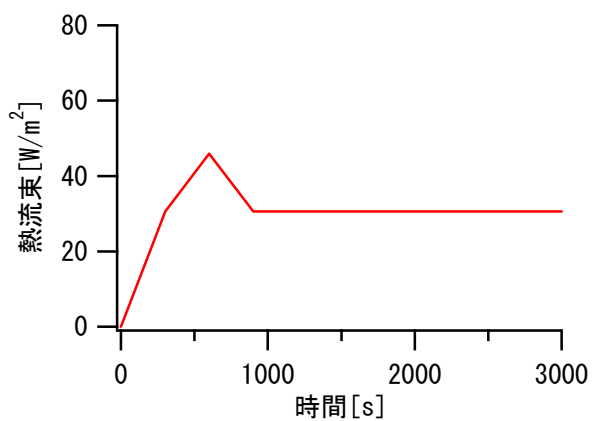
(h) 比較塗料 2.25A



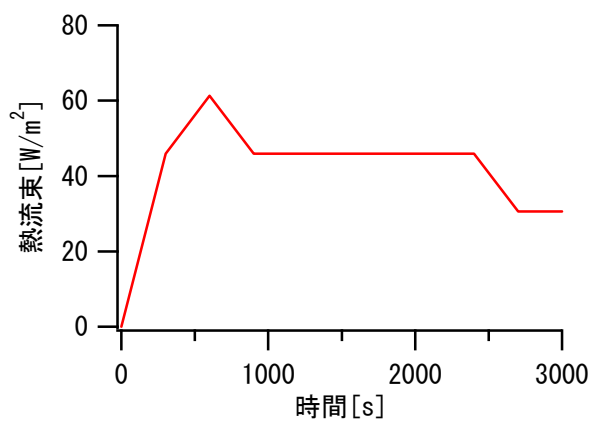
(i) 熱交換塗料 2.0A



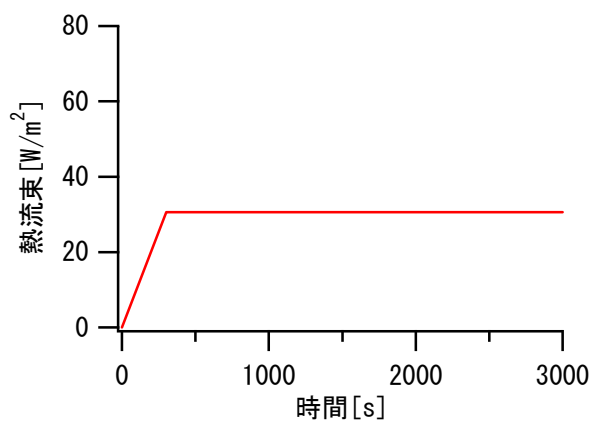
(j) 比較塗料 2.0A



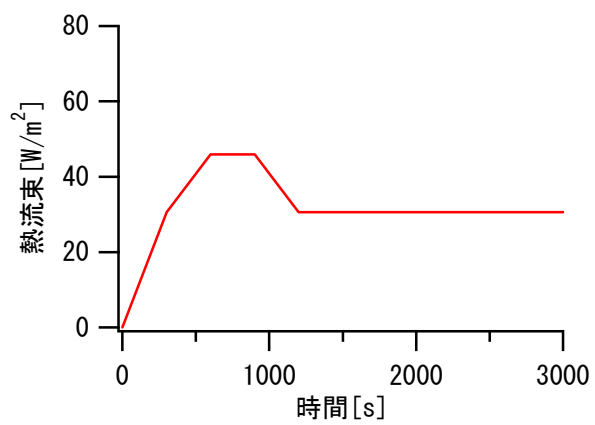
(k) 熱交換塗料 1.75A



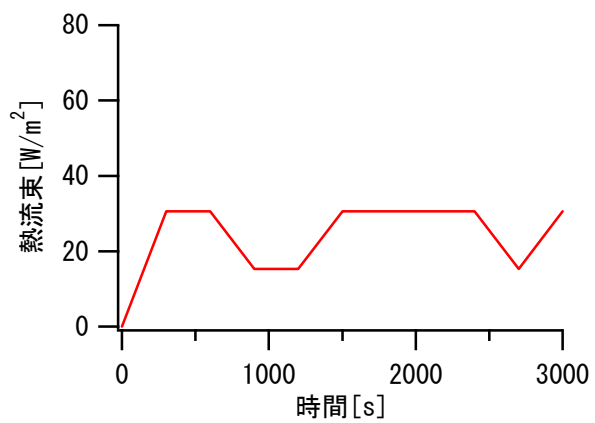
(l) 比較塗料 1.75A



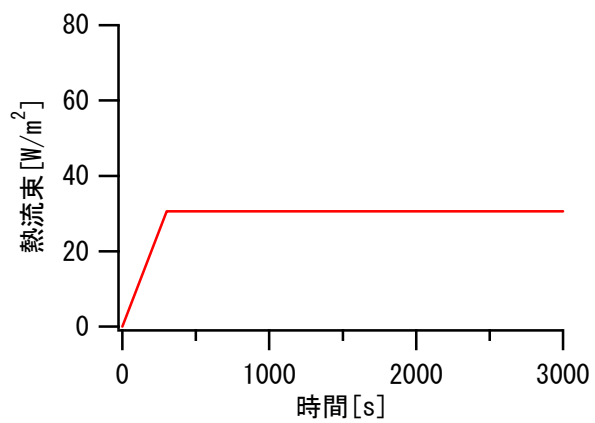
(m) 熱交換塗料 1.25A



(n) 比較塗料 1.25A

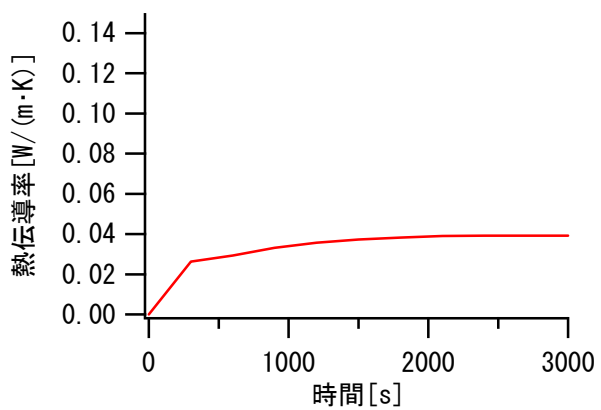


(o) 熱交換塗料 1.0A

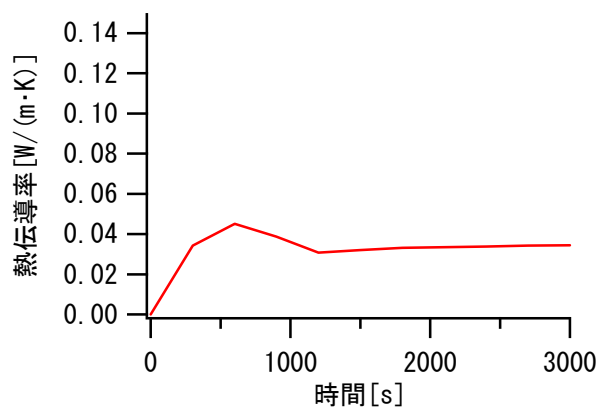


(p) 比較塗料 1.0A

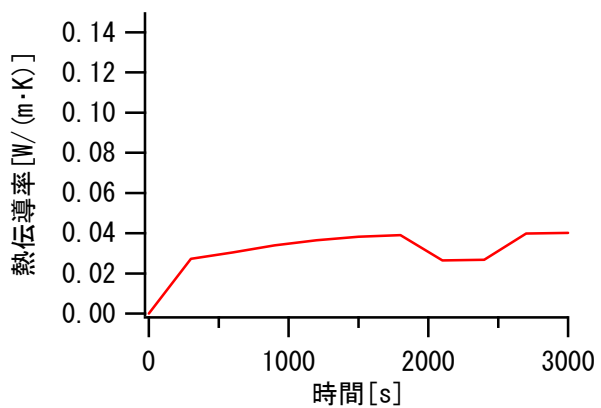
図 4.11 熱流束



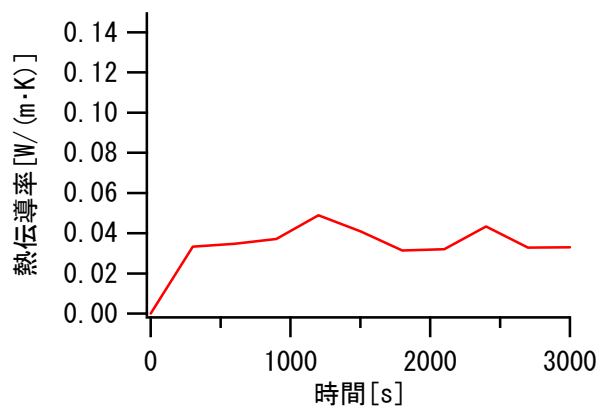
(a) 熱交換塗料 3.0A



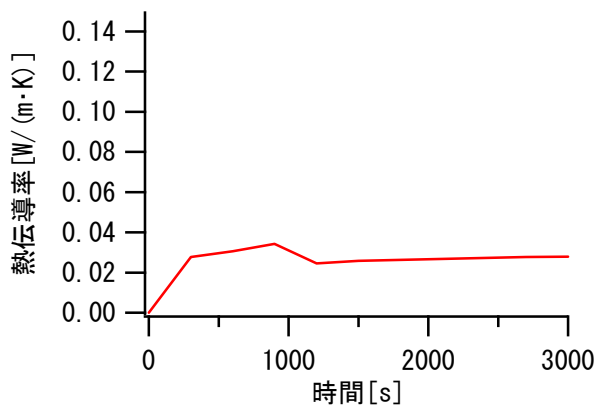
(b) 比較塗料 3.0A



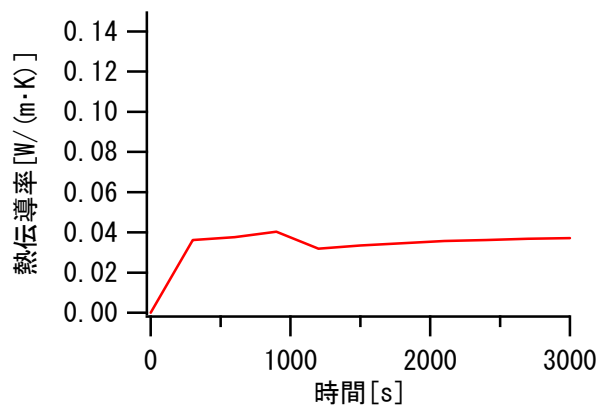
(c) 熱交換塗料 2.75A



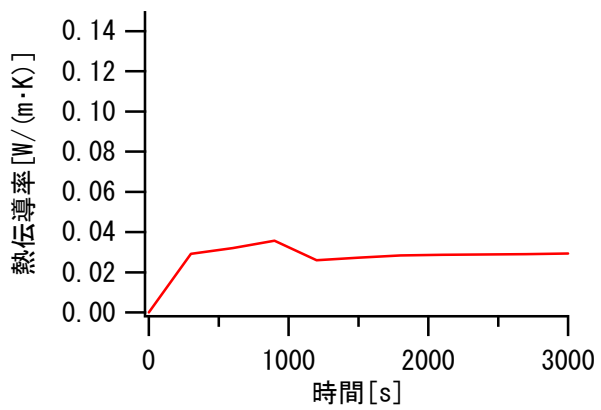
(d) 比較塗料 2.75A



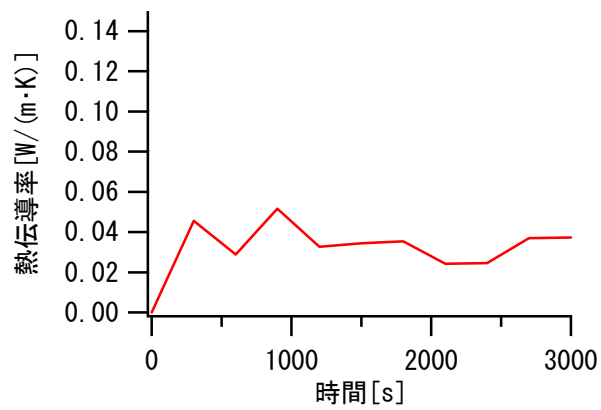
(e) 熱交換塗料 2.5A



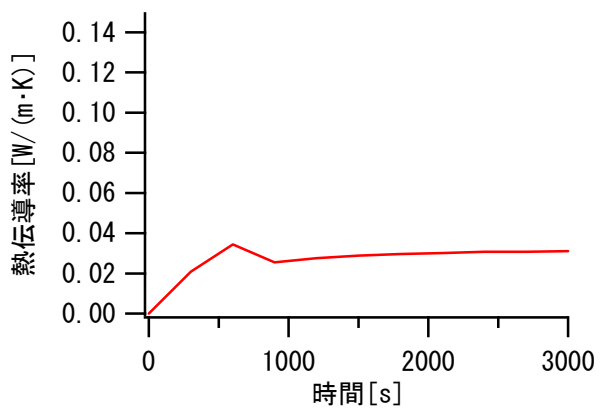
(f) 比較塗料 2.5A



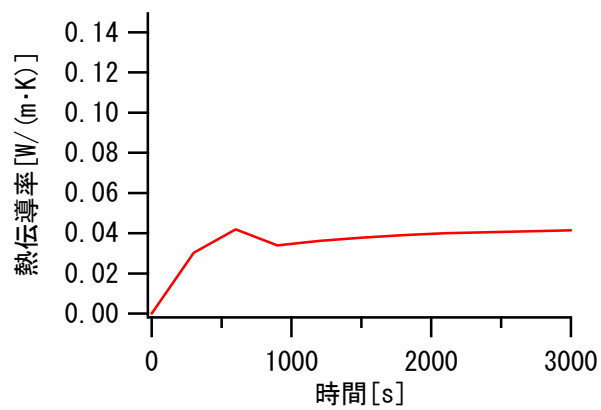
(g) 熱交換塗料 2.25A



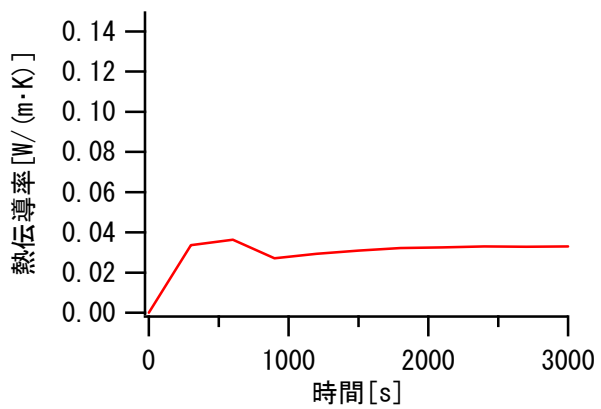
(h) 比較塗料 2.25A



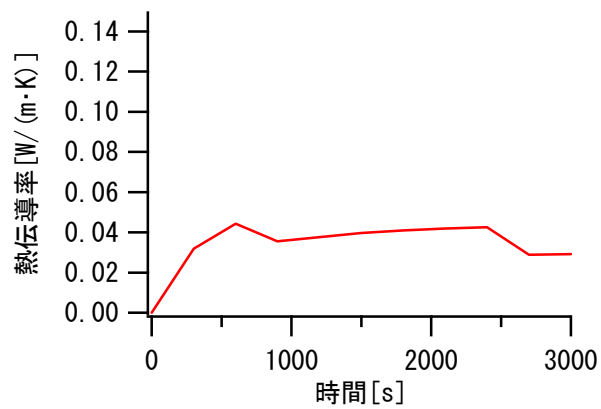
(i) 熱交換塗料 2.0A



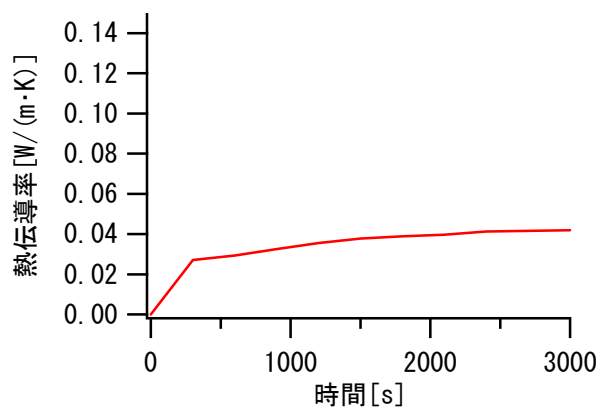
(j) 比較塗料 2.0A



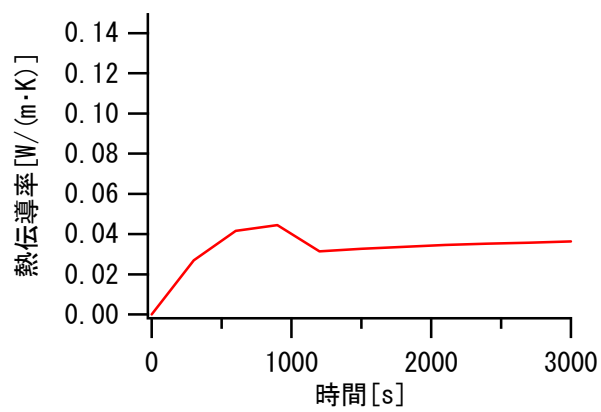
(k) 熱交換塗料 1.75A



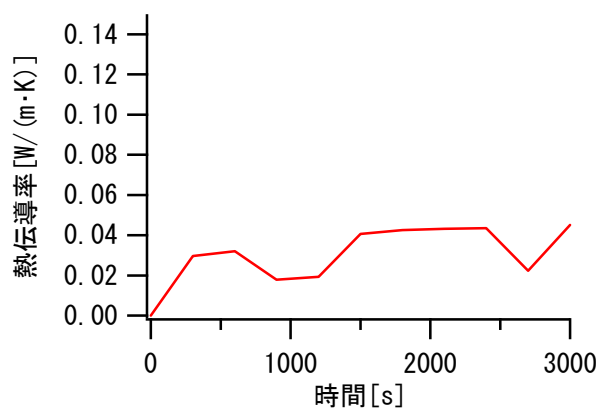
(l) 比較塗料 1.75A



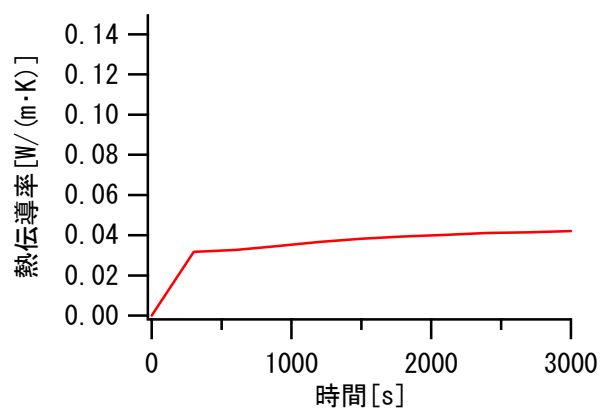
(m) 熱交換塗料 1.25A



(n) 比較塗料 1.25A



(o) 熱交換塗料 1.0A



(p) 比較塗料 1.0A

図 4.12 熱伝導率

第 5 章

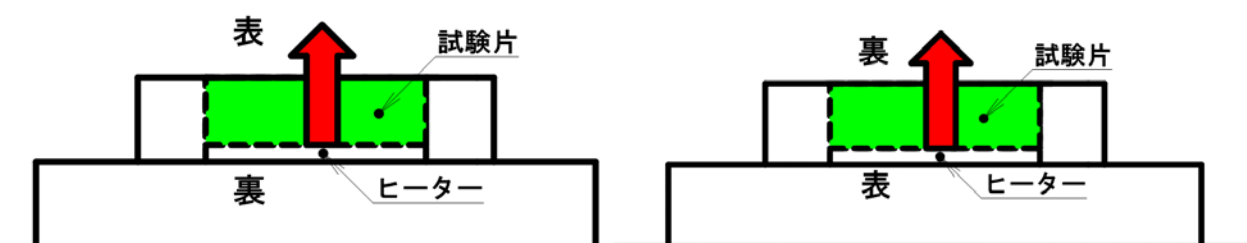
ヒーターを使用した 加熱実験

5.1 実験目的

加熱にヒーターを使用することにより電圧による加熱の制御を行い、 $25\text{V}\sim 17.5\text{V}$ の範囲で 2.25V 刻みに電圧を変化させ第 3 章でできなかった各温度、温度差による熱交換塗料および比較塗料の温度特性を評価する。

熱交換塗料を塗布したとき塗装内部で成分の偏りがあることが確認されており、熱の流れに差異を及ぼしている可能性も考えられる。そこで図 5.1 のように試験片の表裏を逆にして熱の流れを変化させたときの温度特性も実験で評価を行う。

ここでは試験片を作製したとき外気に触れていたほうを表面、枠の内側にあったものを裏面と定義した。



(a) ヒーター側に試験片裏面を設置

(b) ヒーター側に試験片表面を設置

図 5.1 ヒーターに対する試験片の設置方法

5.2 実験装置

5.2.1 実験装置概要

図 5.2 に実験装置を示す。図 5.2 にあるように土台となる断熱材の上にヒーターを敷き、ヒーターの上に試験片を密着させ、試験片の周りを断熱材で囲んだものを使用した第 3 章の実験では高温での熱交換塗料の伝熱特性を調べる事を目的とし行ったが、ライト照射時に実験結果が風などの室内環境に影響を受け更に、温度制御ができないという実験方法の欠点があった。本実験では加熱に電熱線を使用したシリコンラバーヒーターを使用し、電流で加熱を制御できるようにした。加熱部とヒーターを熱伝導ペーストで密着させ熱の流れが一定になるようにした実験装置を使用し、熱交換塗料の温度特性を評価した。なお、熱流束センサー、熱電対、熱伝導ペースト、断熱材は前の章と同じものを使用したため省く。

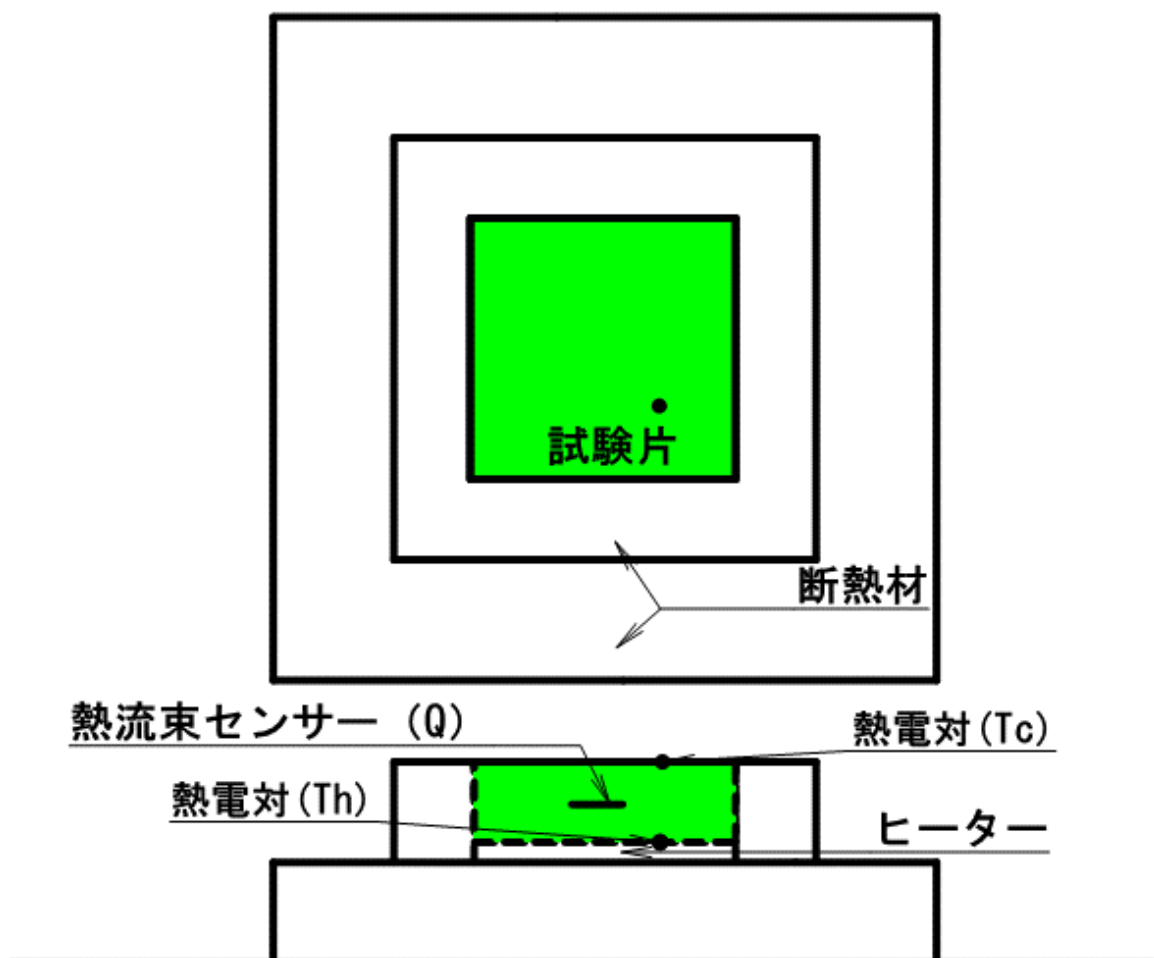


図 5.2 ヒーターを使用した加熱実験

5.2.2 データロガー

(a) データロガー①

図 5.3 にあるデータロガー①で熱流束センサーの出力電圧を計測、記録に使用した。第 4 章では熱流束センサーの出力電圧はデータロガー②で行ったが、出力電圧が小さく、また、データロガー②の分解能から精度に問題があったため熱流束センサーの出力測定にはデータロガー①を使用した。データロガー①の計測記録方法は紙媒体出力なので記録整理の関係から計測周期を 5min で行った。データロガー①の仕様を表 5.1 に示す。

(b) データロガー②

図 5.4 にあるデータロガー②では高温側試験片温度(T_h)、低温側試験片温度(T_c)を計測した。データロガー②では計測結果記録方法が EXCEL の csv 形式ででき記録整理が簡単なため測定周期を 1s とした。データロガー②の仕様を表 5.2 に示す。



図 5.3 データロガー①



図 5.4 データロガー②

表 5.1 データロガー①

形式	横河電機製 3087 形ポータブルハイブリットレコーダ
レンジ(直流電圧)	$\pm 20\text{mV}$
最大分解能	$5\ \mu\text{V}$
測定周期	1min~24 h

表 5.2 データロガー②

形式	横河電機製 Datum-Y XL110
レンジ(直流電圧)	$\pm 100\text{mV}$
最大分解能	$10\ \mu\text{V}$
測定周期	100ms, 1s, 2s, 5s, 10s, 1min, 5min, 10min 等

5.2.3 加熱部

(a) ヒーター

本実験での加熱は温度の変化による塗料の特性の変化を調べるため、電圧で温度を制御できるように電熱線を使用した図 5.5 のシリコンラバーヒーターを使用した。シリコンラバーヒーターの仕様を表 5.3 に示す。

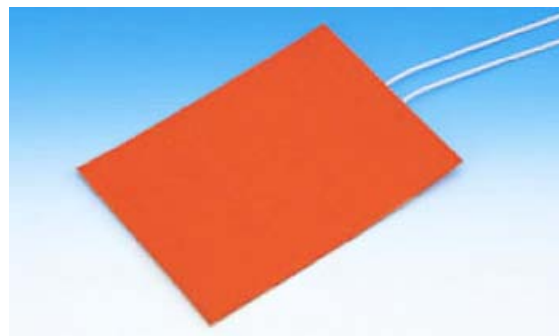


図 5.5 シリコンラバーヒーター

表 5.3 シリコンラバーヒーター

形式	坂口伝熱社製 サミコンヒーター
外寸	75×70×0.5mm
使用温度	-55℃～230℃

(b) 電源

ヒーターの電源には図 5.6 にある高砂製作所製の直流電源装置 GP035-10 を使用した。表 5.4 に電源の仕様を示す。



図 5.6 電源

表 5.4 直流電源

形式	高砂製作所製 直流電源 GP035-10
出力電圧範囲	0-35V
出力電流範囲	0-10A

5.3 実験手順

以下の手順に従って実験を行う。

1. データロガーの電源を入れ熱流束センサー、熱電対の接続を確認する。
2. データロガーで計測を始める
3. 計測開始から 5 分後からヒーターに電力を投入し加熱を開始する。
4. ヒーターに電力を投入してから 1 時間半後に電力の供給を停止。
5. ヒーターへの電力の供給停止から 5 分後にデータロガーの計測を終了。
6. 熱交換塗料、比較塗料の各試験片で 3 回ずつ実験を行う。
7. 実験終了

5.4 実験結果

ヒーターにかける電圧を 25V から 17.5V まで 2.25V 刻みで変化させ加熱実験を行った。

図 5.7 にヒーターを使用した加熱実験における各電流、熱の流れが裏から表へ抜けるときの熱交換塗料と比較塗料の高温側及び低温側試験片表面温度の時間変化を示す。ヒーターに電流を流し始めると 600 秒程度までの間に、図上の高温側試験片表面温度を表す赤い線が急激に上昇していることがわかる。高温側試験片表面温度の急激な温度上昇に数百秒ほど送れて図上の低温側試験片表面温度を表す青い線が緩やかに上昇している。試験片温度について比べてみると全体的に熱交換塗料のほうが温度が高めの結果となった。図 5.8 に熱の流れが表から裏になったときの熱交換塗料と比較塗料の高温側及び低温側試験片表面温度の時間変化を示す。図 5.7 の熱の流れが裏から表のときと同様に熱交換塗料の高温側、低温側試験片温度が高い傾向となった。

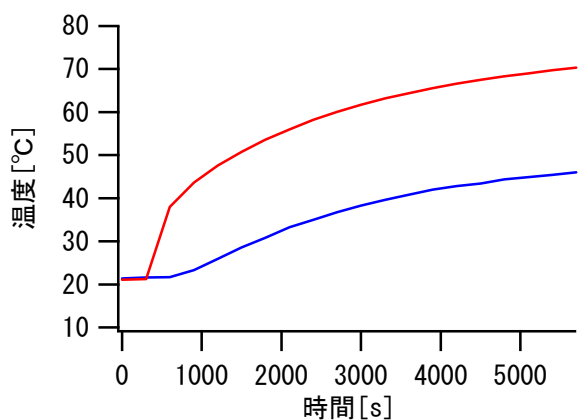
図 5.9 はヒーターを使用した加熱実験における各電圧、熱の流れが裏から表へ抜けるときの熱交換塗料と比較塗料の高温側、低温側試験片温度差の結果を示す。ここでの温度差は図 5.11 の矢印にあるように高温側試験片温度と低温側試験片温度の温度差である。計測開始から 5 分後にヒーターへ電流を流し始めると高温側試験片表面温度が急激に上昇するために温度差も急激に上昇した。前章での冷却実験では実験はじめの急激な温度降下の時、温度差は最大となったが、加熱実験では温度差は緩やかに大きくなっていく。温度差について熱交換塗料と比較塗料を比べると熱交換塗料の方が温度差が小さくなった。実験開始後 1000 秒までは熱交換塗料の温度勾配が大きく温度上昇しやすいが 1000 秒以降では比較塗料の温度上昇勾配のほうが若干大きくなっている。図 5.10 に熱の流れが表から裏になったときの熱交換塗料と比較塗料の高温側、低温側試験片温度差の結果を示す。全体的に熱交換塗料のほうが温度差が大きくなった。

図 5.12 はヒーターを使用した加熱実験における各電圧、熱の流れが裏から表へ抜けるときの熱交換塗料と比較塗料の温度上昇の結果である。ここで指す温度上昇とは図 5.14 の矢印にあるように低温側試験片温度の実験開始温度と各時間の低温側試験片温度の差である。実験開始から 400 秒ほどまでは変化があまりないが、これは高温側から低温側へ熱が伝わるのに時間がかかるためである。その後、高温側からの熱量と低温側の熱量の放出が安定的となり緩やかに低温側試験片温度が上がっていく。すべての電圧で熱交換塗料のほうが温度上昇が大きい結果となった。図 5.13 に熱の流れが表から裏になったときの熱交換塗料と比較塗料の温度上昇の結果である。ここでも熱交換塗料の温度上昇が比較塗料を上回った。

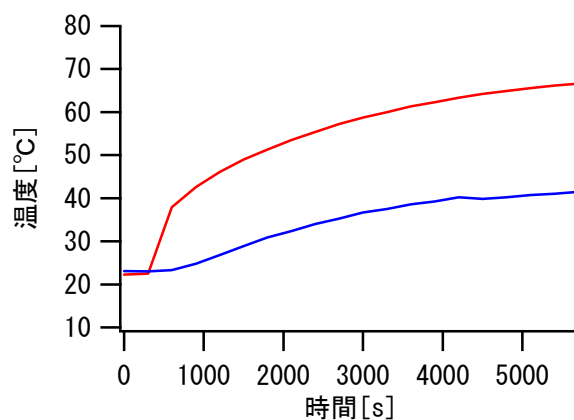
図 5.15 はヒーターを使用した加熱実験における各電圧、熱の流れが裏から表へ抜けるときの熱交換塗料と比較塗料の熱流束の結果である。ヒーターによる加熱による高温側、低温側試験片表面温度の変化に伴い熱流速も変化していることがわかる。実験開始後か

ら 1000 秒程度まで熱流束は急激に上昇し、その後の熱流束は緩やかに上昇を続ける、この時高温側試験片温度は緩やかに温度上昇を続けている。全体を通して熱交換塗料と比較塗料比べると熱交換塗料の熱流束の方が小さい値を示す結果となった。最大値で熱交換塗料が $102.6[\text{W}/\text{m}^2]$ 、比較塗料が $134.7[\text{W}/\text{m}^2]$ となった。図 5.16 に熱交換塗料の熱の流れを変化させたときの熱流束比較結果を示す。試験片裏面をヒーターで加熱し試験片の裏面から表面にかけ熱が流れるときの熱流束の最大値が $102.6[\text{W}/\text{m}^2]$ 、試験片表面をヒーターで加熱し試験片の表面から裏面にかけ熱が流れるときの熱流束の最大値が $153.1[\text{W}/\text{m}^2]$ となった。

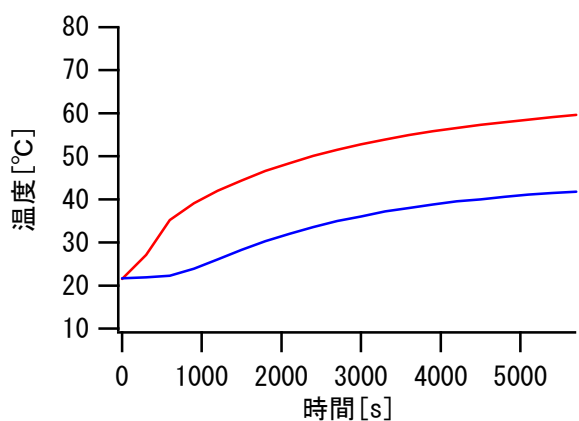
図 5.17 はヒーターを使用した加熱実験における各電圧、熱の流れが裏から表へ抜けるときの熱交換塗料と比較塗料の高温側、低温側試験片温度と熱流束結果から求められた熱伝導率の結果である。熱伝導率は熱流束値等から求められるため熱流束の波形に似ており、実験開始から 1000 秒までの間に急激に上昇し、その後熱流束が安定的になるにつれ熱伝導率も安定した値をとる。熱伝導率の値を熱交換塗料と比較塗料とで比べると若干熱交換塗料のほうが大きい値をとることがわかる。図 5.18 に熱の流れが表から裏になったときの熱交換塗料と比較塗料の高温側、低温側試験片温度と熱流束結果から求められた熱伝導率の結果である。比較塗料のほうで熱伝導率が高い結果となった。



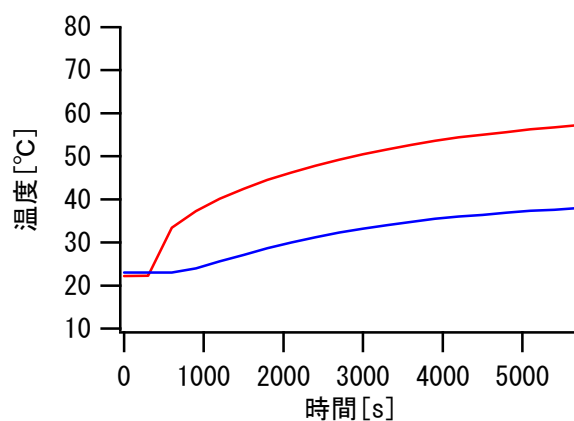
(a) 熱交換塗料 25V



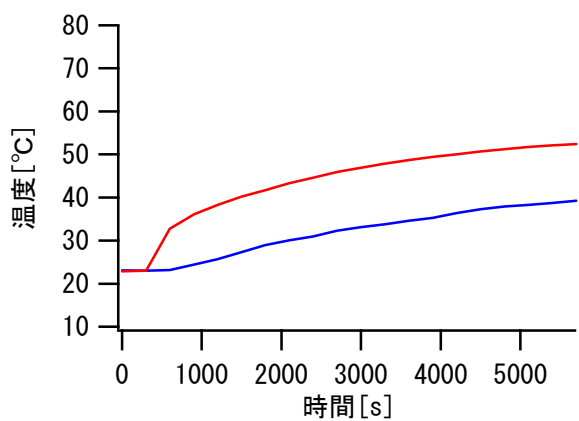
(b) 比較塗料 25V



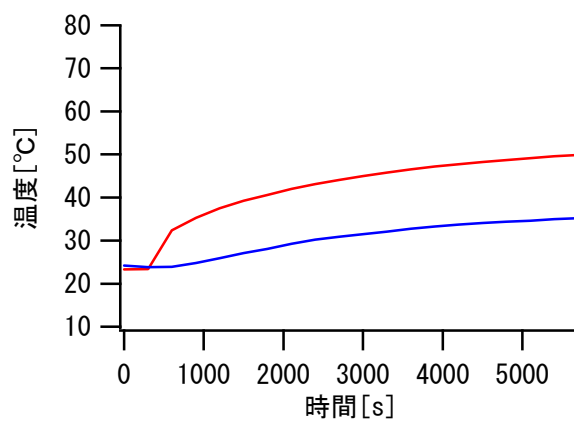
(c) 熱交換塗料 22.5V



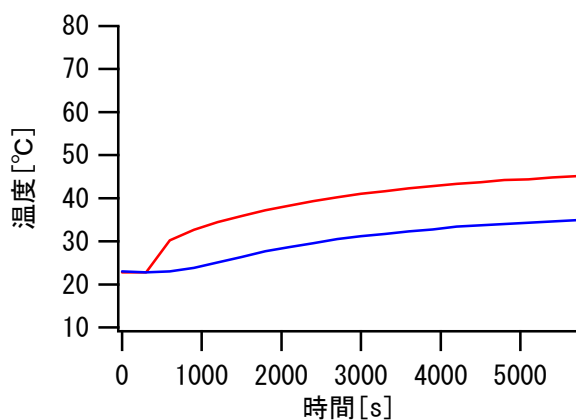
(d) 比較塗料 22.5V



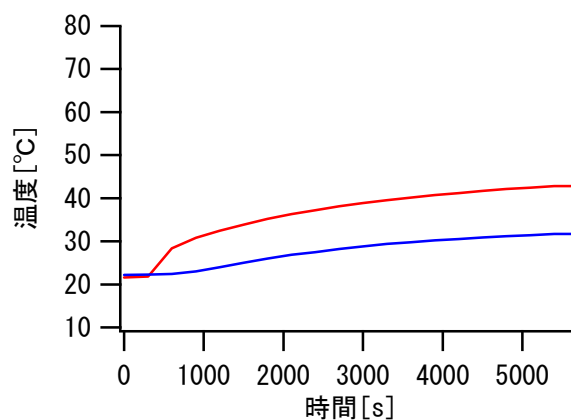
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V



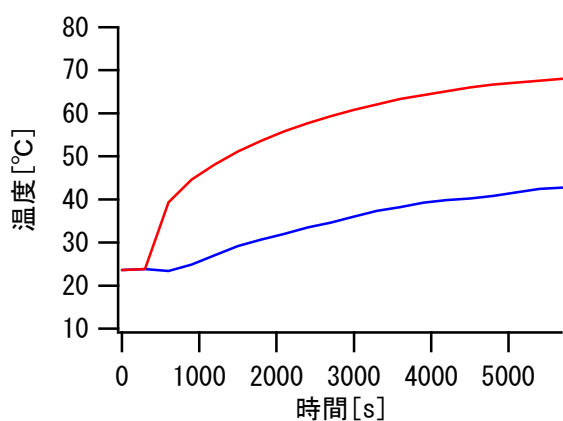
(g) 熱交換塗料 17.5V



(h) 比較塗料 17.5V

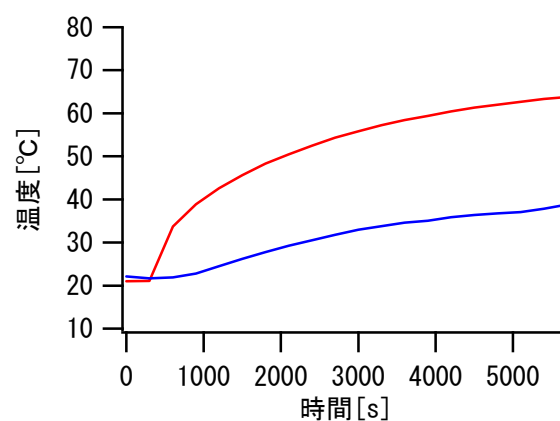
図 5.7 試験片温度[熱の流れ：裏から表]

熱交換

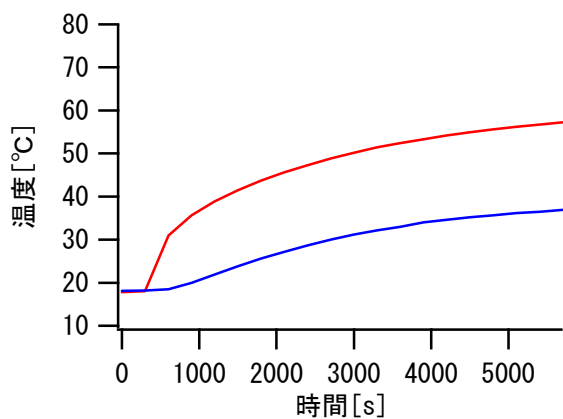


(a) 熱交換塗料 25V

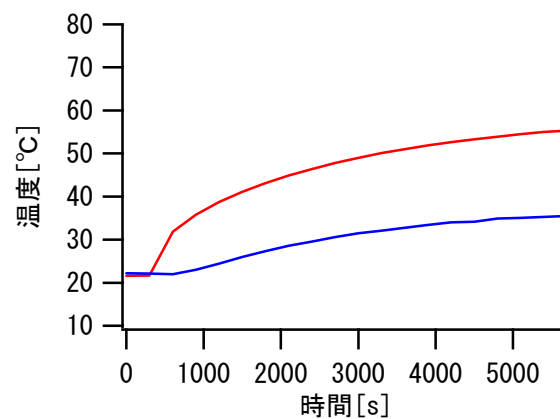
比較



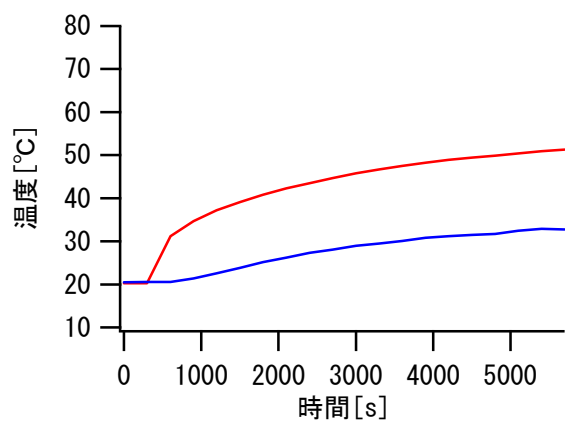
(b) 比較塗料 25V



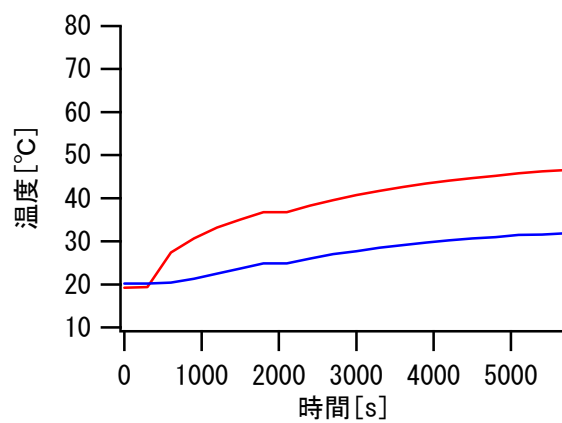
(c) 熱交換塗料 22.5V



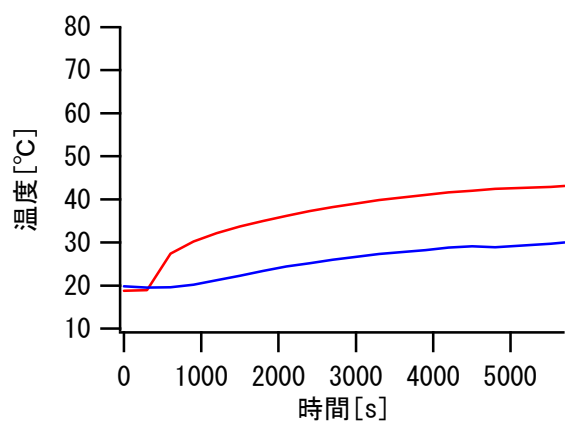
(d) 比較塗料 22.5V



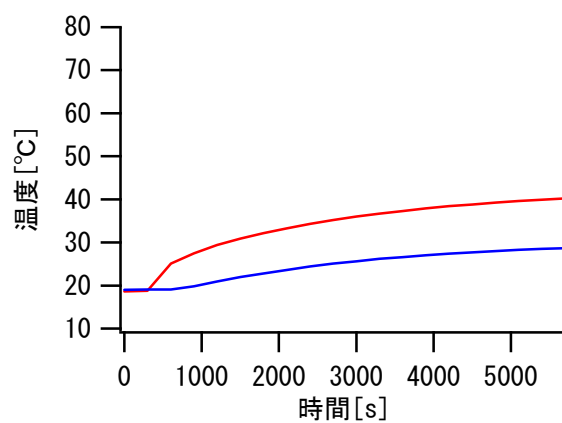
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V

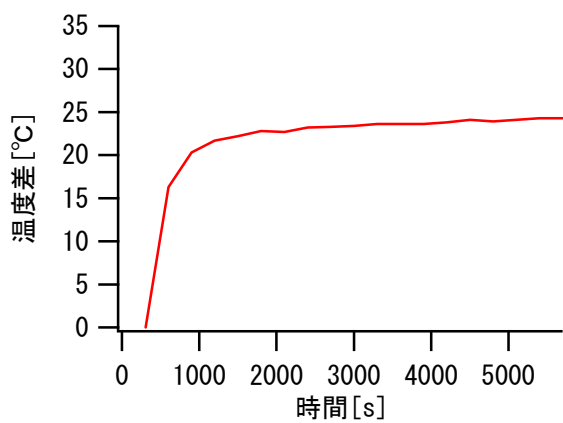


(g) 熱交換塗料 17.5V

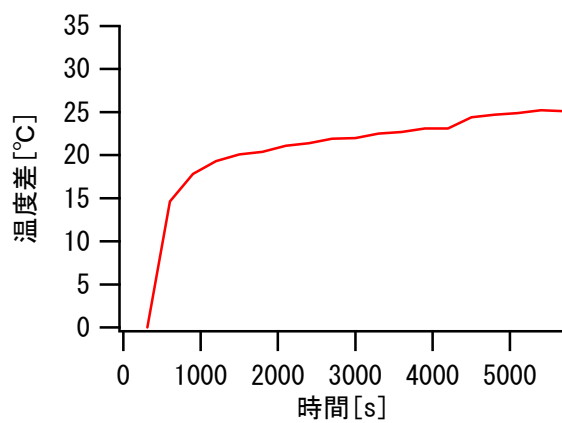


(h) 比較塗料 17.5V

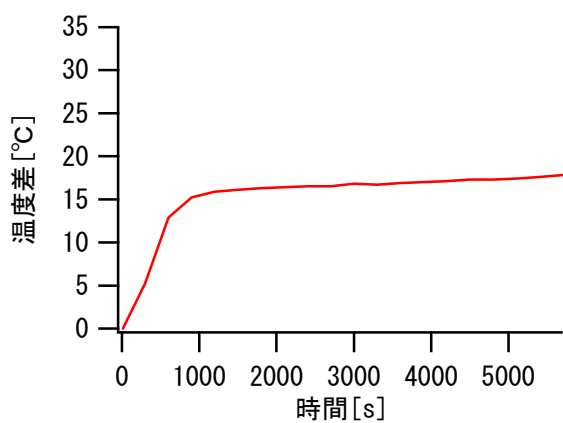
図 5.8 試験片温度[熱の流れ：表から裏]



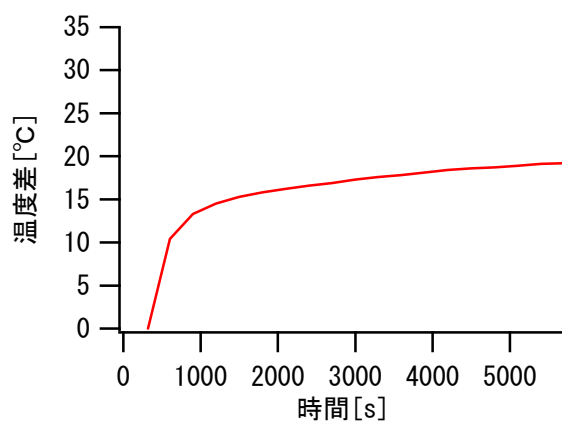
(a) 熱交換塗料 25V



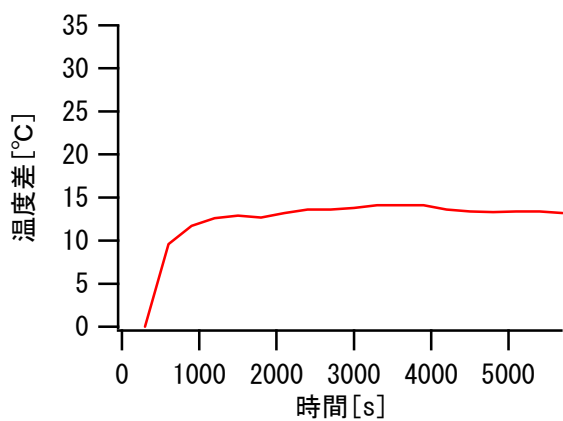
(b) 比較塗料 25V



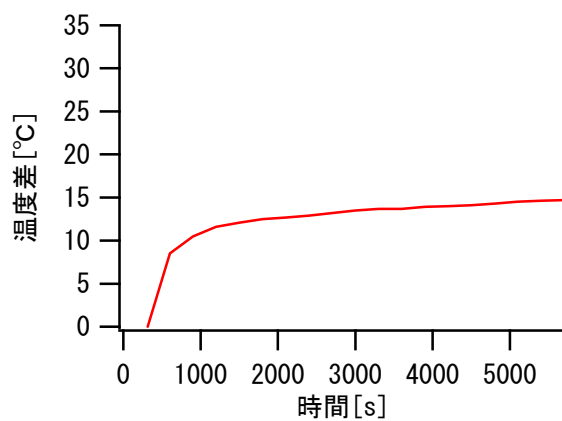
(c) 熱交換塗料 22.5V



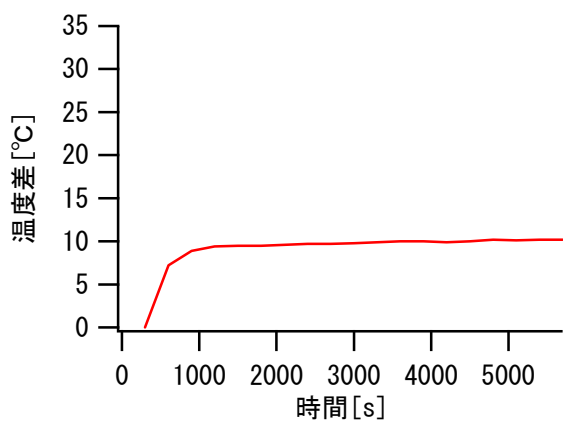
(d) 比較塗料 22.5V



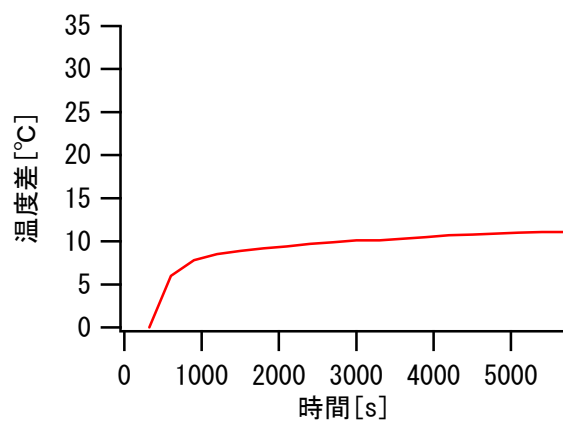
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V

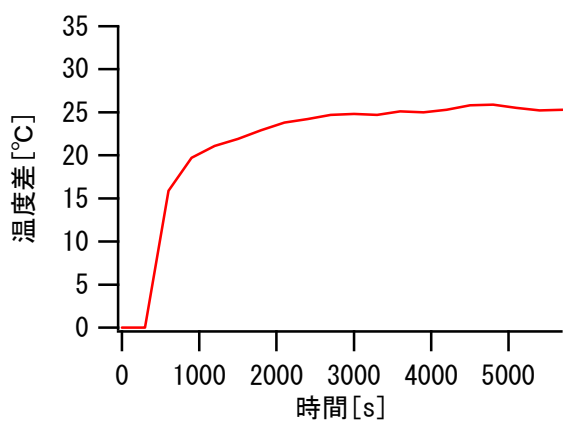


(g) 熱交換塗料 17.5V

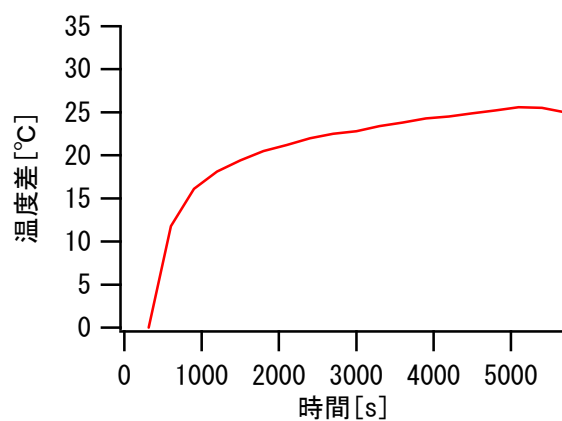


(h) 比較塗料 17.5V

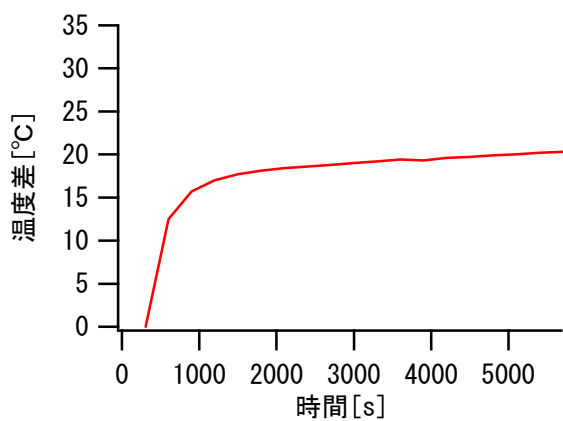
図 5.9 温度差[熱の流れ：裏から表]



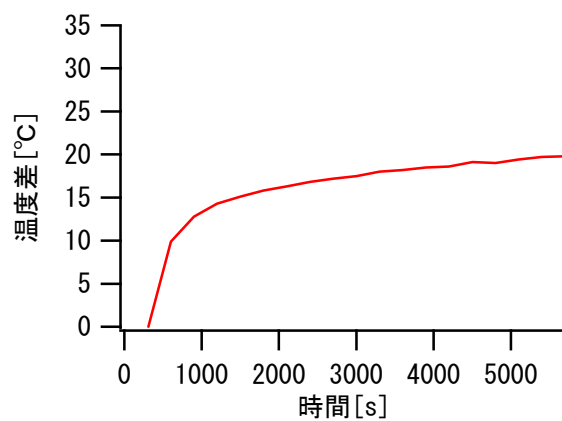
(a) 熱交換塗料 25V



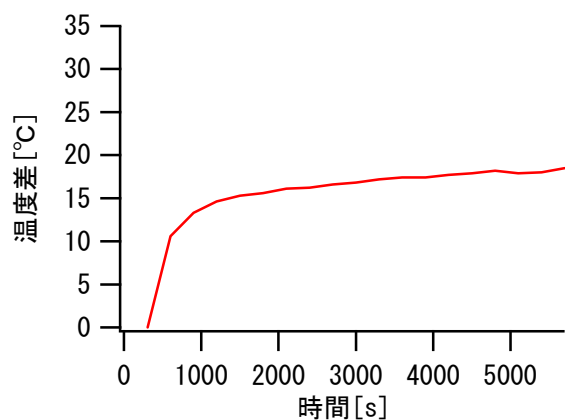
(b) 比較塗料 25V



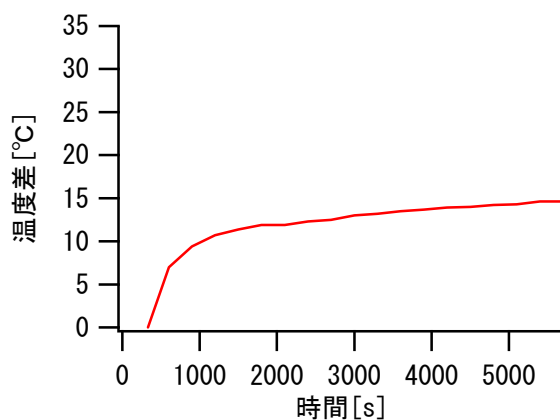
(c) 熱交換塗料 22.5V



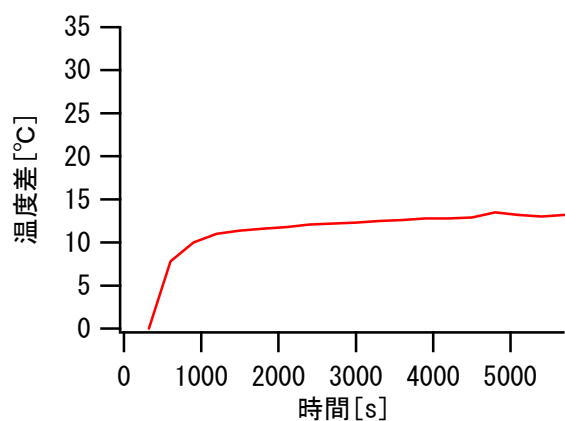
(d) 比較塗料 22.5V



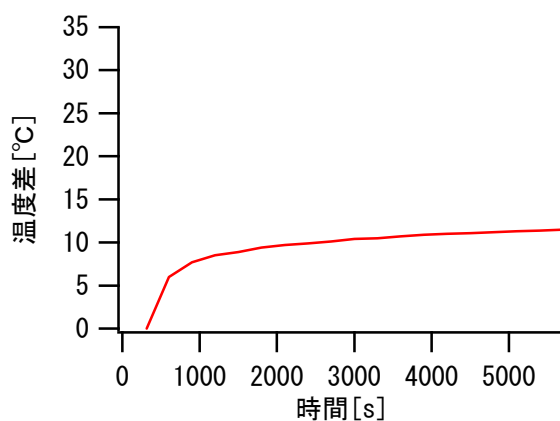
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V



(g) 熱交換塗料 17.5V



(h) 比較塗料 17.5V

図 5.10 温度差[熱の流れ：表から裏]

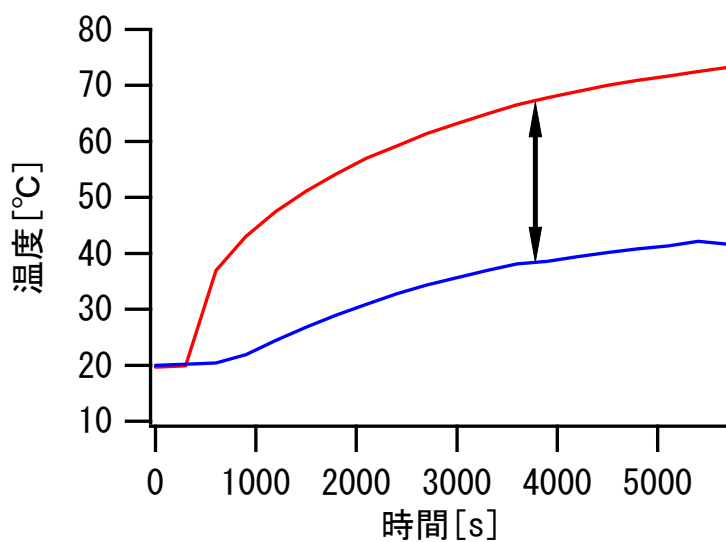
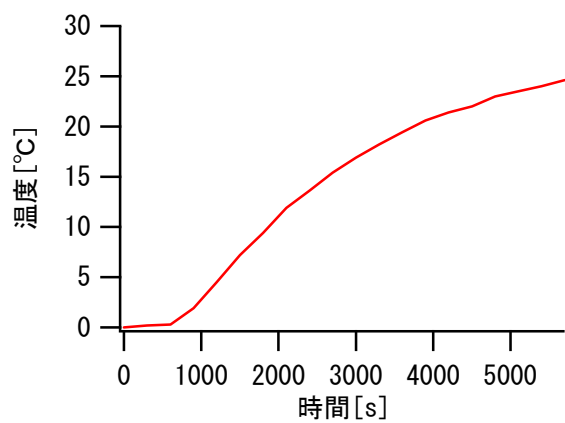
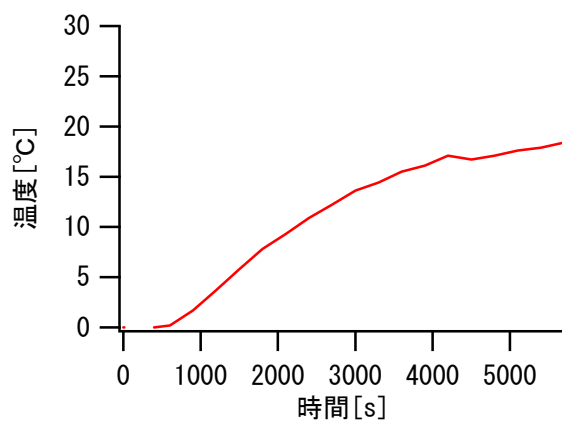


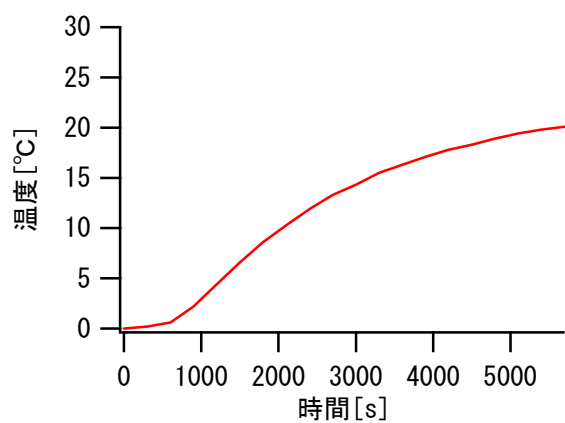
図 5.11 温度差説明図



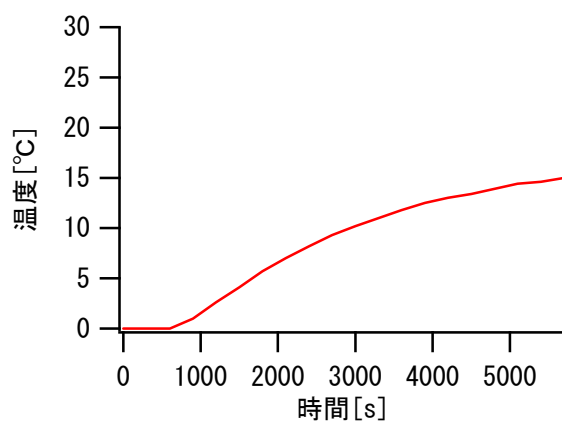
(a) 熱交換塗料 25V



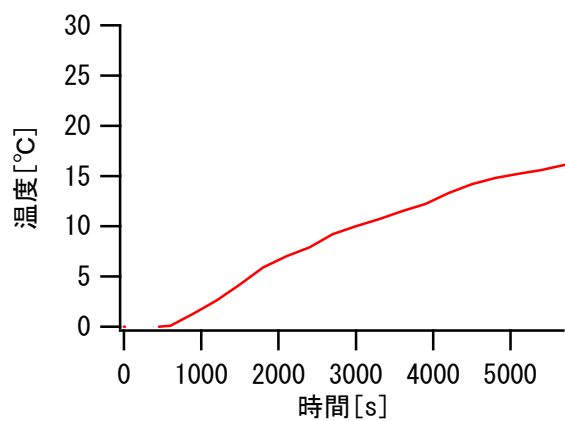
(b) 比較塗料 25V



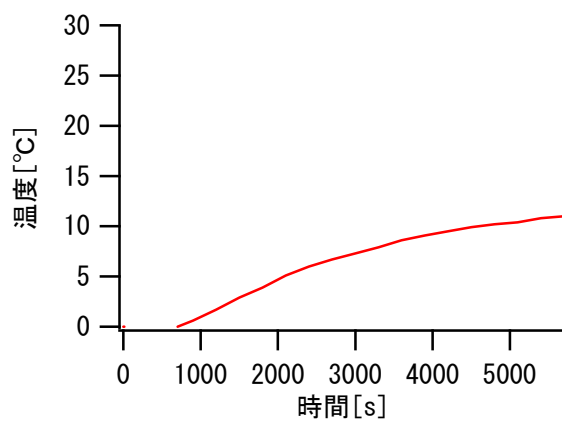
(c) 熱交換塗料 22.5V



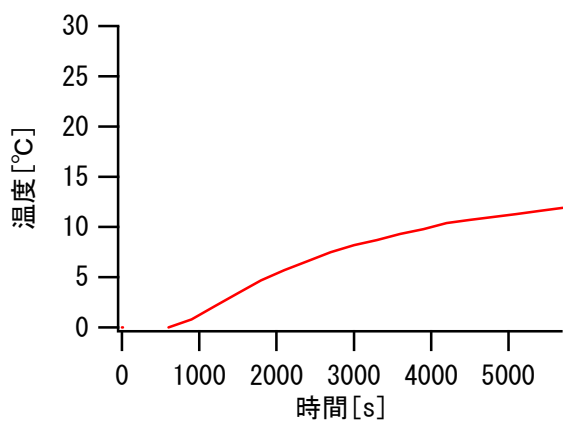
(d) 比較塗料 22.5V



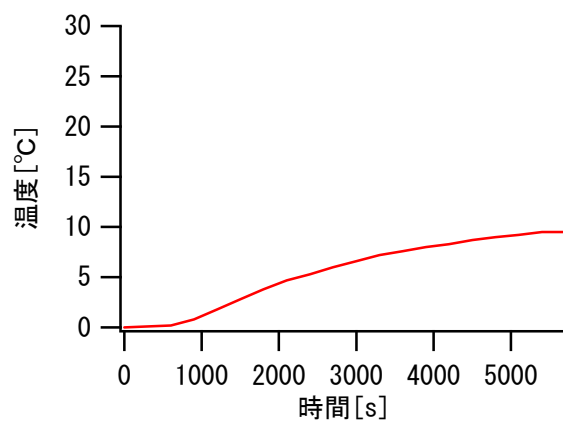
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V

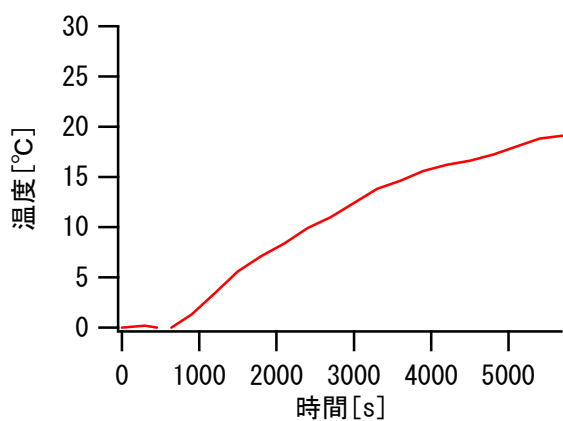


(g) 熱交換塗料 17.5V

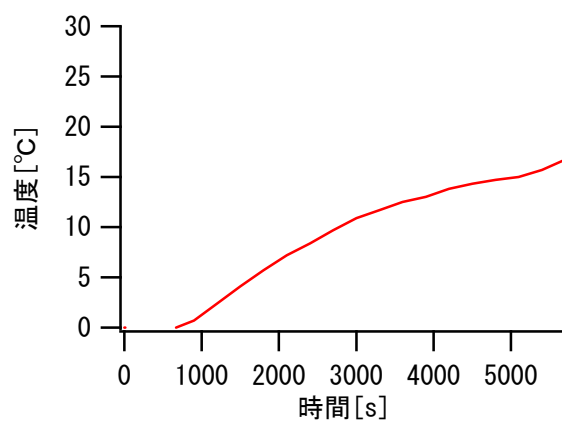


(h) 比較塗料 17.5V

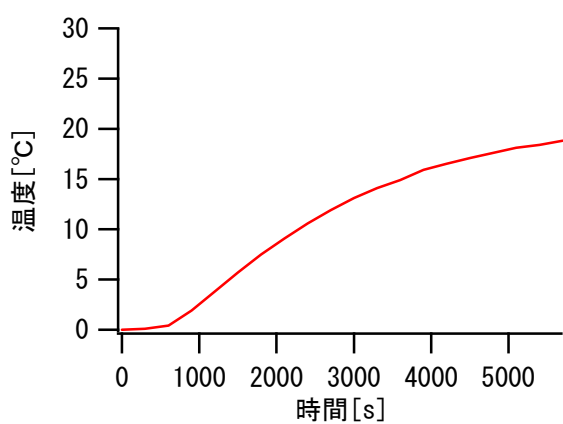
図 5.12 温度上昇[熱の流れ：裏から表]



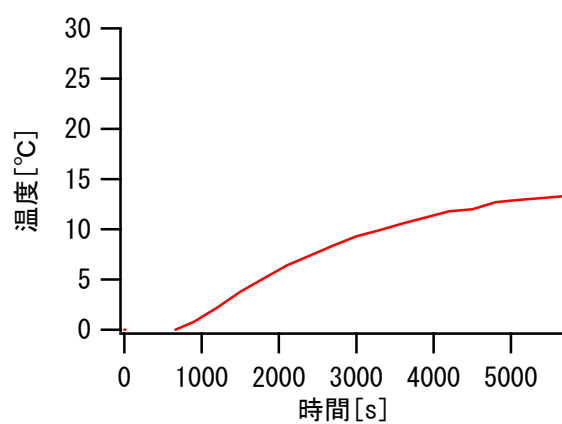
(a) 熱交換塗料 25V



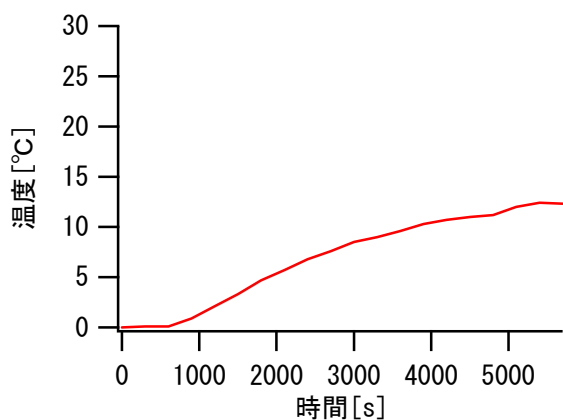
(b) 比較塗料 25V



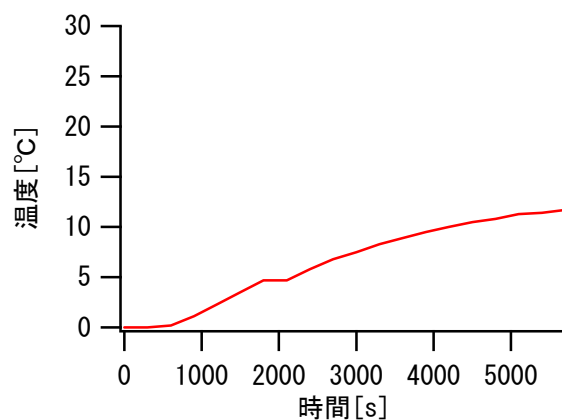
(c) 熱交換塗料 22.5V



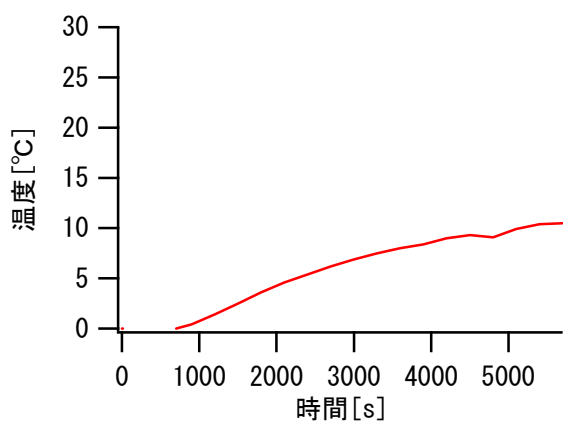
(d) 比較塗料 22.5V



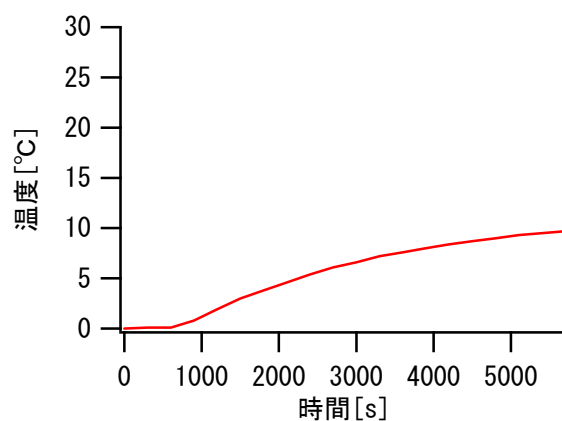
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V



(g) 熱交換塗料 17.5V



(h) 比較塗料 17.5V

図 5.13 温度上昇[熱の流れ：表から裏]

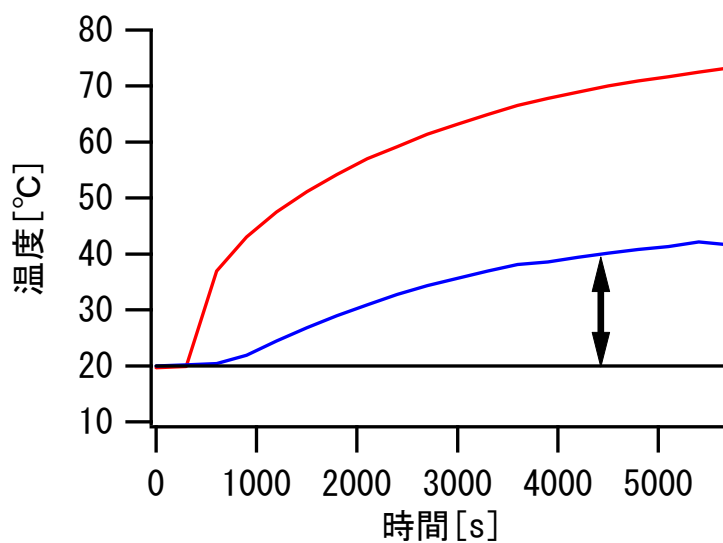
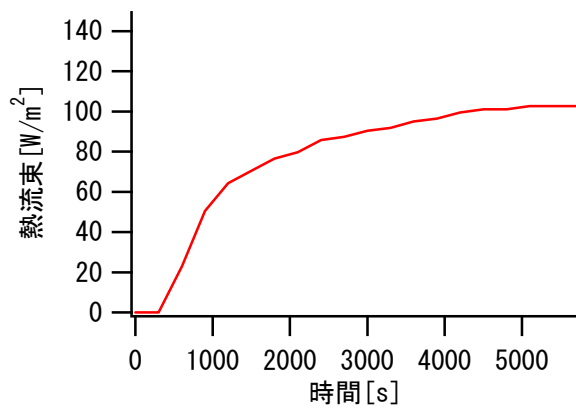
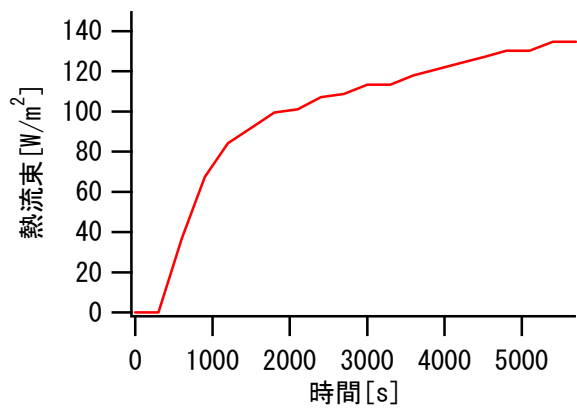


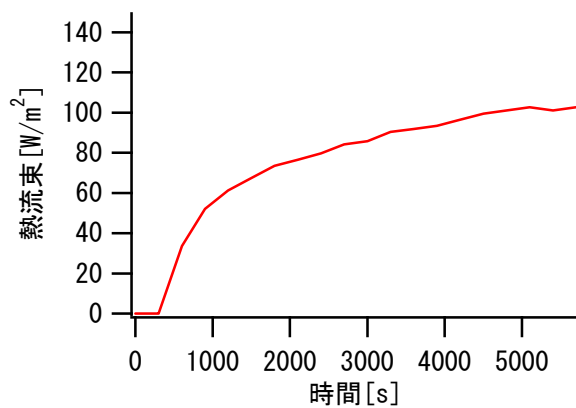
図 5.14 温度上昇説明図



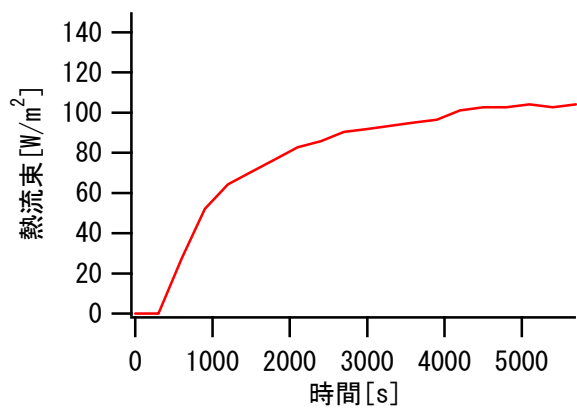
(a) 熱交換塗料 25V



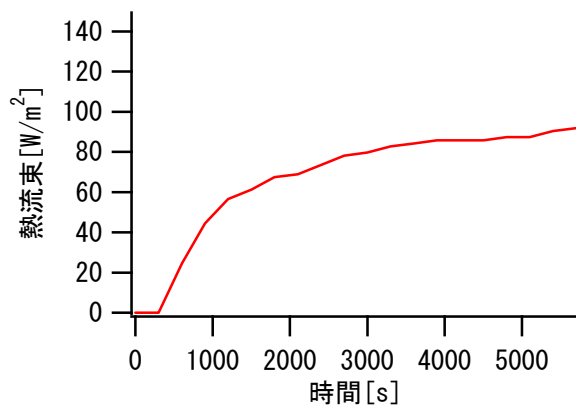
(b) 比較塗料 25V



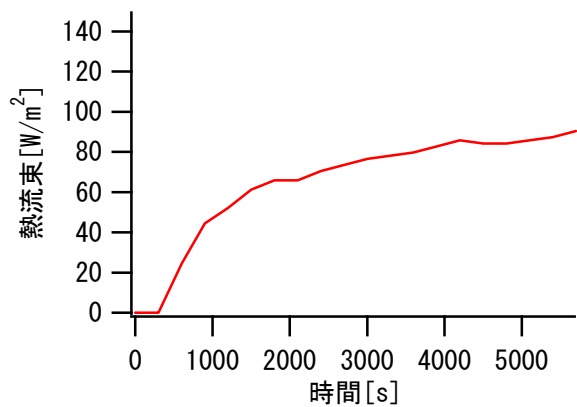
(c) 熱交換塗料 22.5V



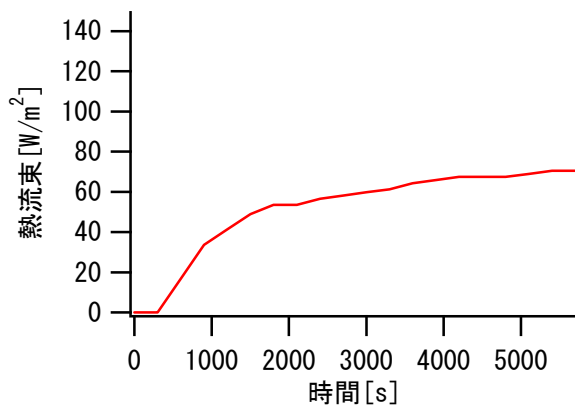
(d) 比較塗料 22.5V



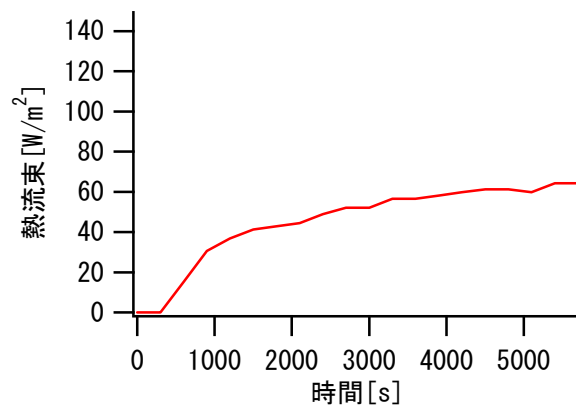
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V

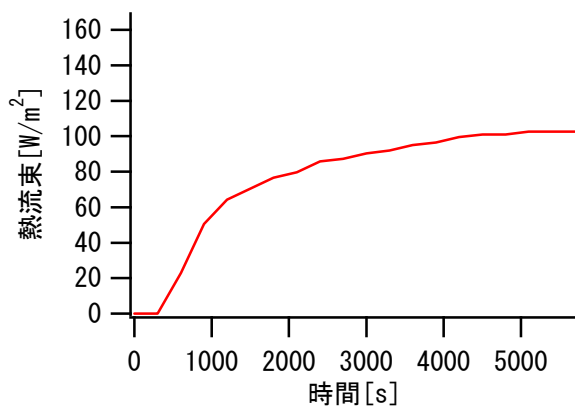


(g) 熱交換塗料 17.5V

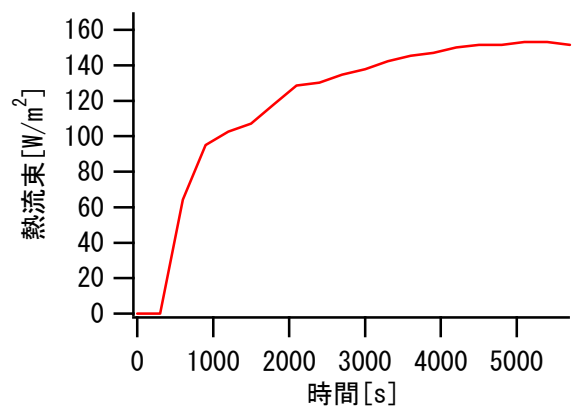


(h) 比較塗料 17.5V

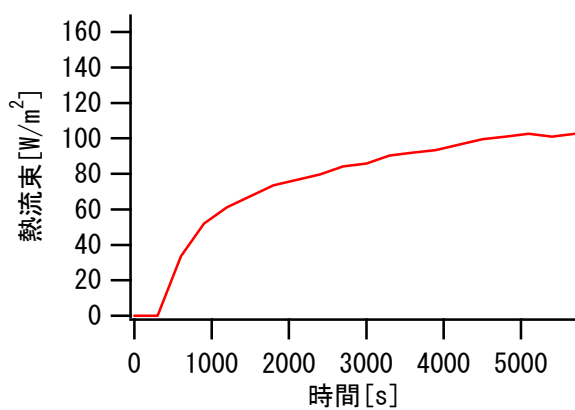
図 5.15 熱流束[熱の流れ：裏から表]



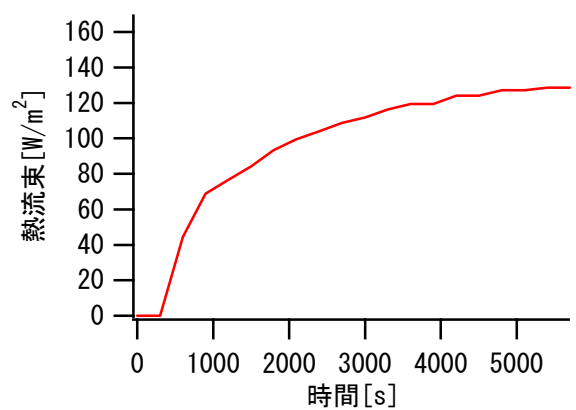
(a) [熱の流れ：裏から表] 25V



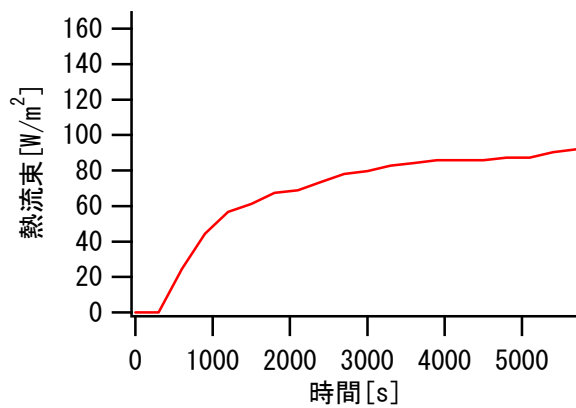
(b) [熱の流れ：表から裏] 25V



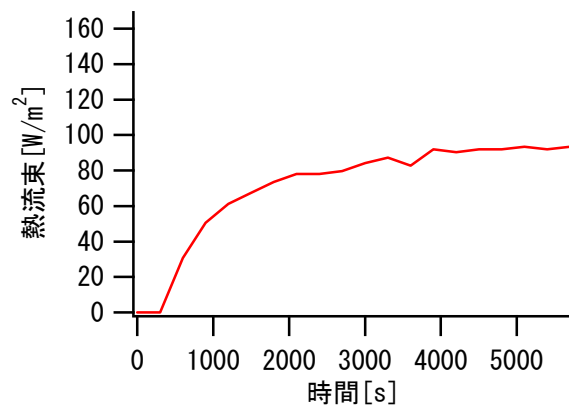
(c) [熱の流れ：裏から表] 22.5V



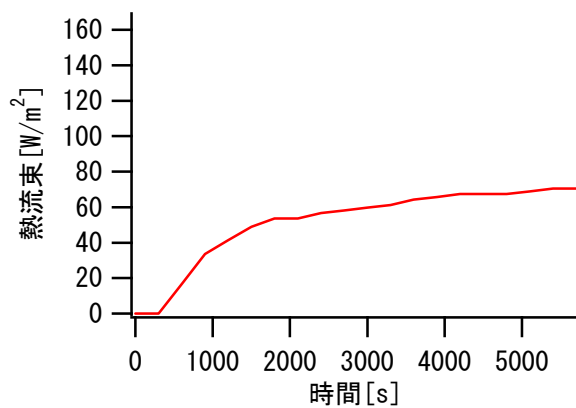
(d) [熱の流れ：表から裏] 22.5V



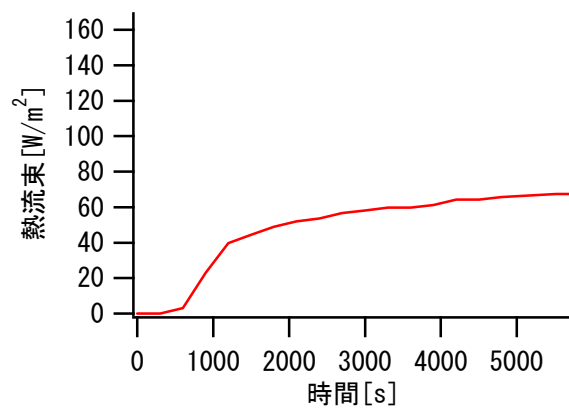
(e) [熱の流れ：裏から表] 20V



(f) [熱の流れ：表から裏] 20V

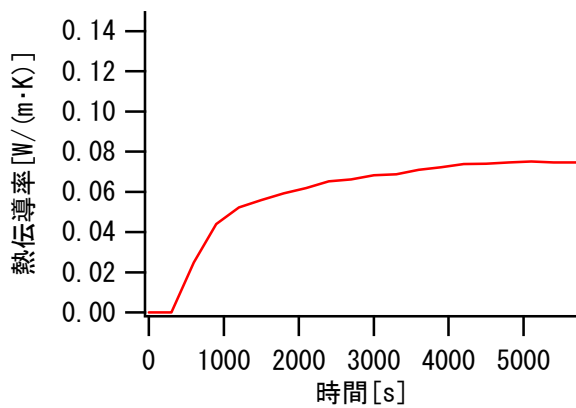


(g) [熱の流れ：裏から表] 17.5V

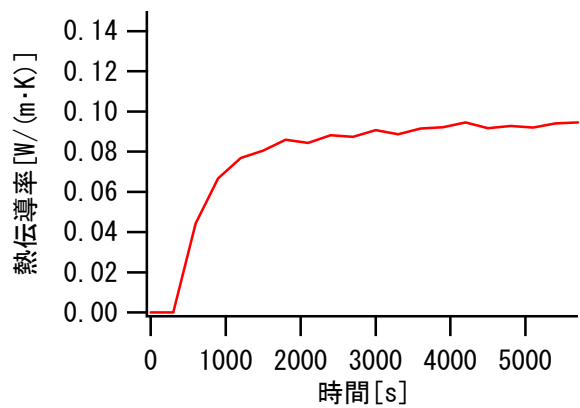


(h) [熱の流れ：表から裏] 17.5V

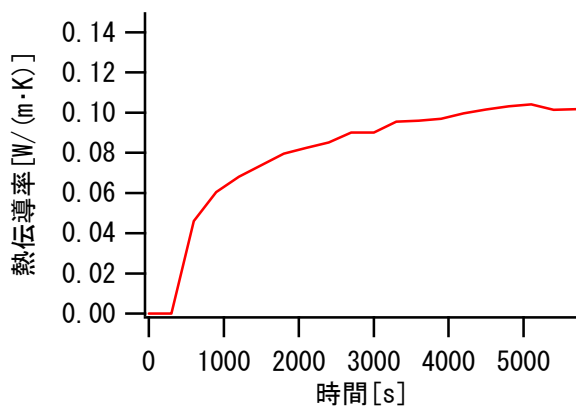
図 5.16 熱交換塗料の熱の流れを変化させた場合の熱流束比較



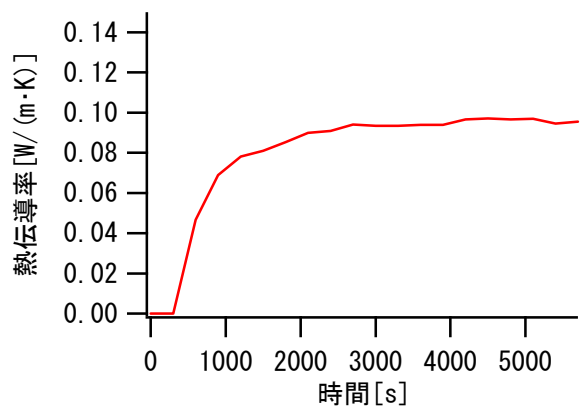
(a) 熱交換塗料 25V



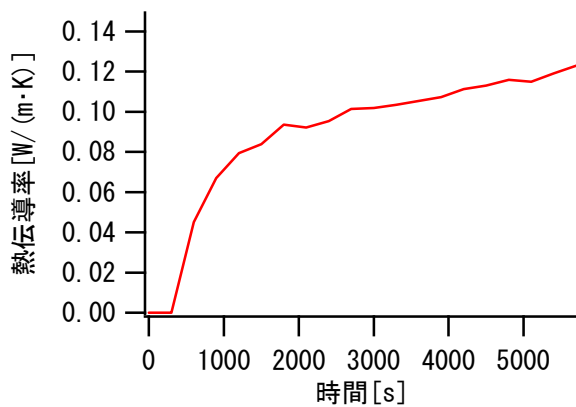
(b) 比較塗料 25V



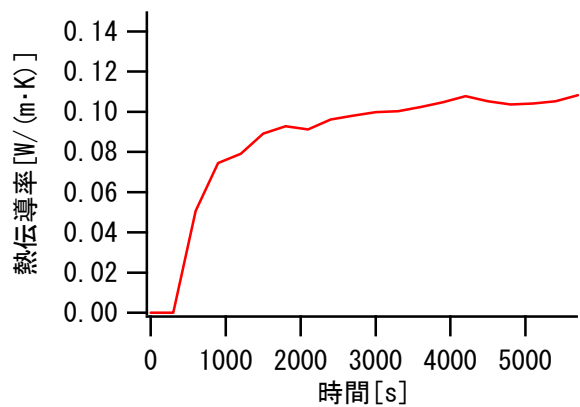
(c) 熱交換塗料 22.5V



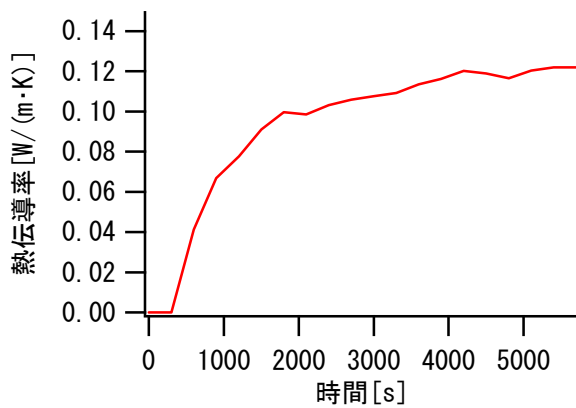
(d) 比較塗料 22.5V



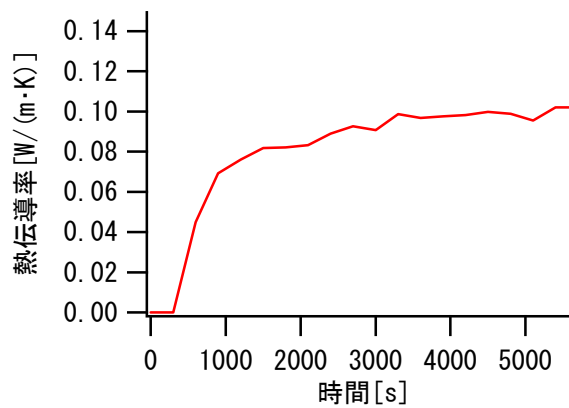
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V

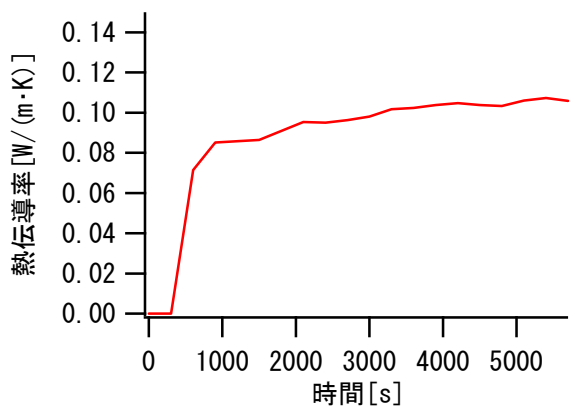


(g) 熱交換塗料 17.5V

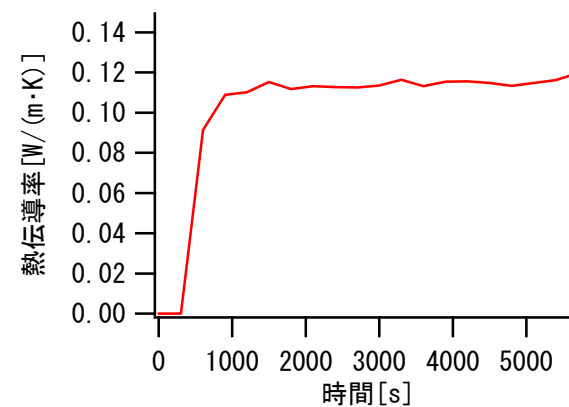


(h) 比較塗料 17.5V

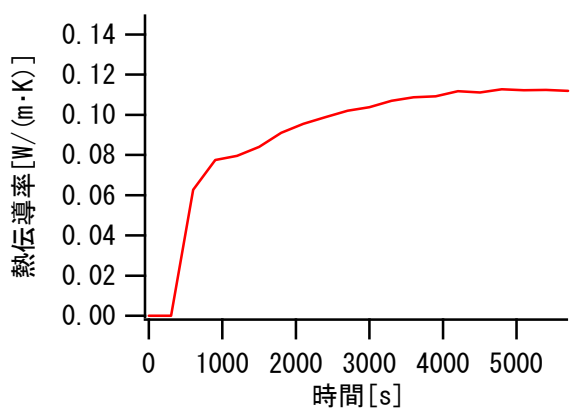
図 5.17 熱伝導率[熱の流れ：裏から表]



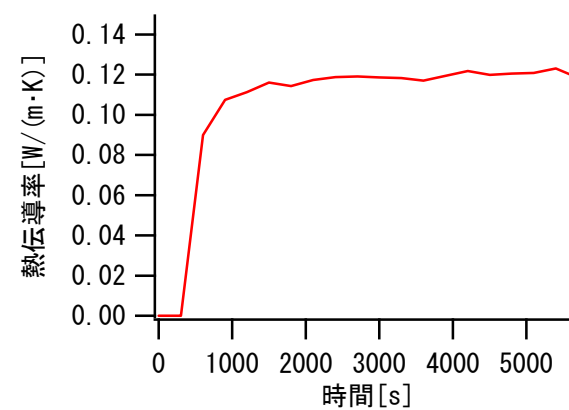
(a) 熱交換塗料 25V



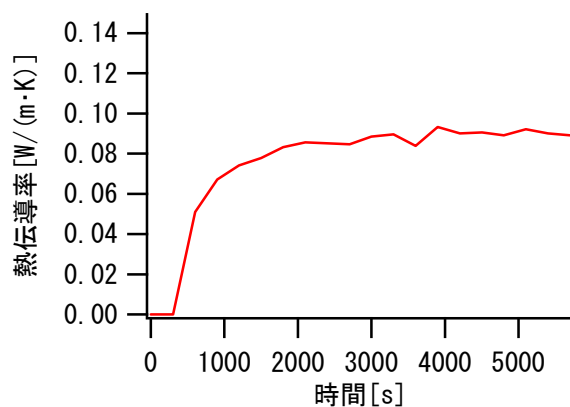
(b) 比較塗料 25V



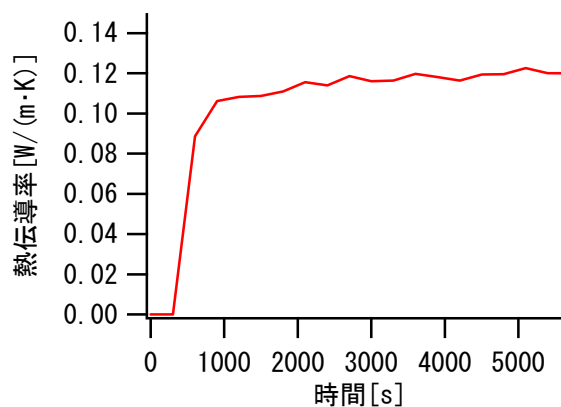
(c) 熱交換塗料 22.5V



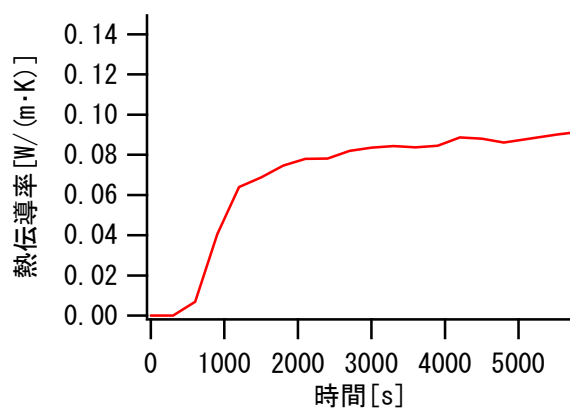
(d) 比較塗料 22.5V



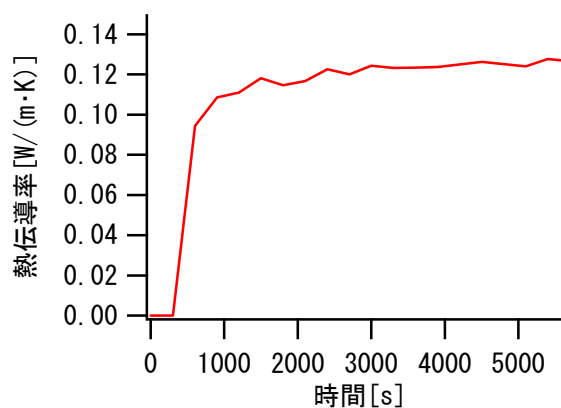
(e) 熱交換塗料 20V



(f) 比較塗料 20V



(g) 熱交換塗料 17.5V



(h) 比較塗料 17.5V

図 5.18 熱伝導率[熱の流れ：表から裏]

第 6 章

放熱量計測実験

6.放熱量計測実験

6.1 実験目的

夏の夕方、日が陰ってもアスファルトやコンクリートが暑いことがある。これはアスファルトやコンクリートの放熱性が低いため、温度を蓄熱することから起きている。放熱量計測実験では熱交換塗料の放熱量について実験・評価を行う。

6.2 実験装置

6.2.1 実験装置概要

実験装置を図 6.1 に示す。土台となる断熱材の上に熱源となるヒーターを敷きその上に試験片をのせ側面を断熱材で囲み、試験片表面中心から 10mm の高さに熱放射を測定する熱流束センサーを設置する。実験中は風などの影響を受けないように断熱材で作製された箱で密閉する。なお試験片の高温側、低温側温度、箱内温度を測定するため熱電対により温度計測を行った。

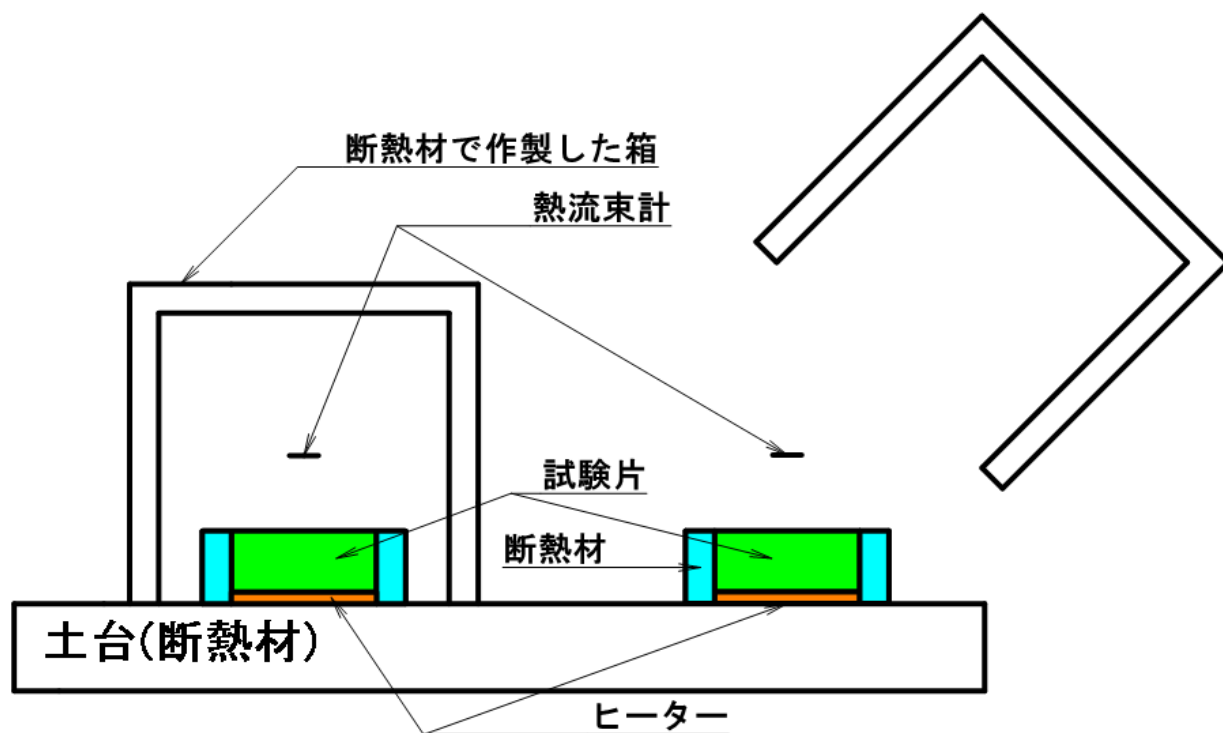


図 6.1 放熱量計測実験装置

6.3 実験手順

以下の手順に従って実験を行う。

1. データロガーの電源を入れ熱流束センサー、熱電対の接続を確認する。
2. データロガーで計測を始める
3. 計測開始から 5 分後からヒーターに電源を投入し加熱を開始する。
4. ヒーターの電源を投入 90 分後に電源停止。
5. ヒーターの電源停止から 5 分後にデータロガー記録停止。
6. 熱交換塗料、比較塗料各試験片を作製し、3 回ずつ実験を行う。
7. 実験終了

6.4 実験結果

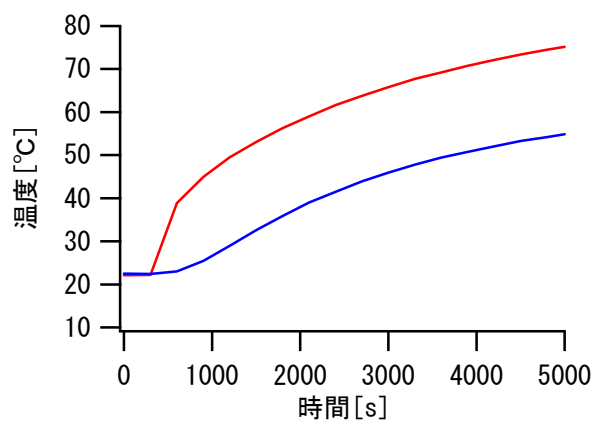
図 6.2、図 6.3 は試験片の表面あるいは裏面をヒーターで加熱した場合の熱交換塗料と比較塗料の高温側、低温側試験片温度結果を示す。

熱交換塗料の温度が全体的に高い結果となった。

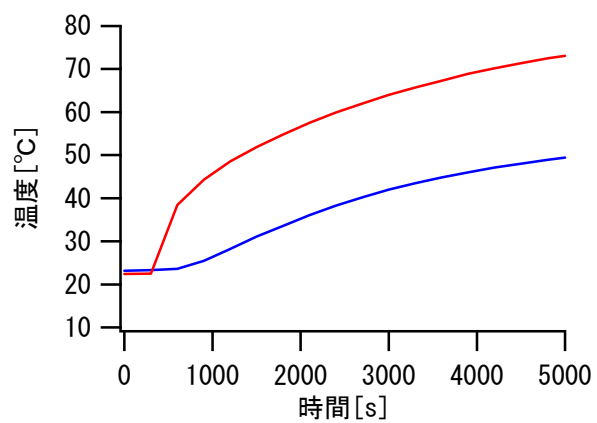
図 6.4、図 6.5 は放熱量計測実験における熱交換塗料と比較塗料の箱内温度結果を示す。試験片裏面をヒーターで加熱した場合 27.5V では熱交換塗料 25℃、比較塗料 25.1℃試験片表面をヒーターで加熱した場合逆方向 27.5V では熱交換塗料 24.4℃、比較塗料 24.4℃となった、実験では試験片表面を加熱した場合の差がほとんど確認できなかった。

図 6.6、図 6.7 は放熱量計測実験における試験片裏面をヒーターで加熱した場合、試験片表面をヒーターで加熱した場合熱交換塗料と比較塗料の熱流束結果を示す。

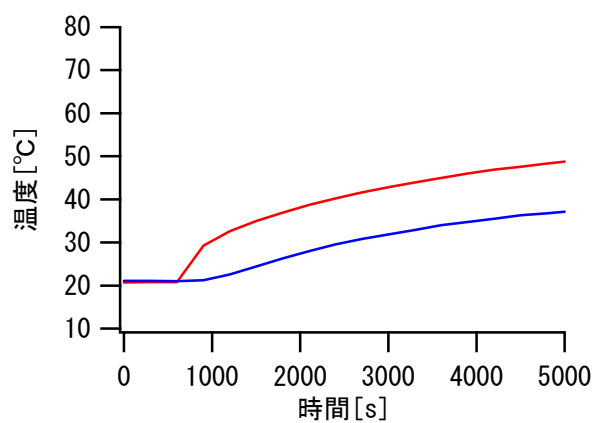
試験片裏面をヒーターで加熱した場合 27.5V では熱交換塗料 30.6[W/m²]、比較塗料 42.9[W/m²]試験片表面をヒーターで加熱した場合 27.5V では熱交換塗料 27.6[W/m²]、比較塗料 30.6[W/m²]となり、試験片裏面をヒーターで加熱した場合のほうが大きいという結果となった。



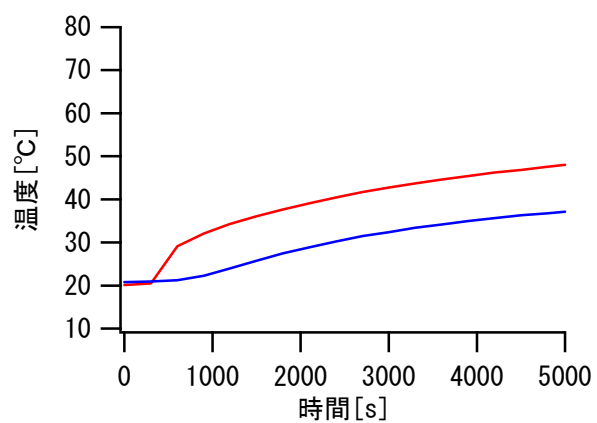
(a) 熱交換塗料 27.5V



(b) 比較塗料 27.5V

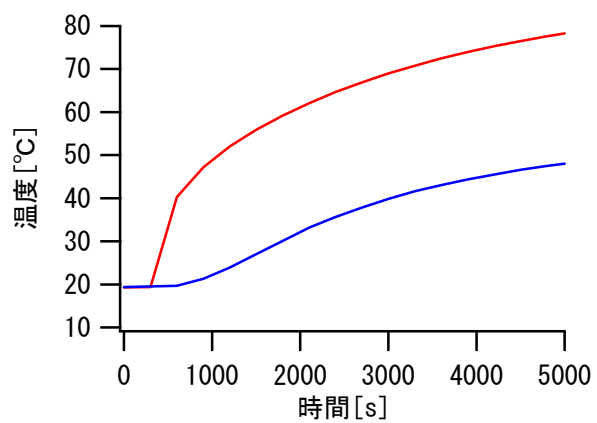


(c) 熱交換塗料 20V

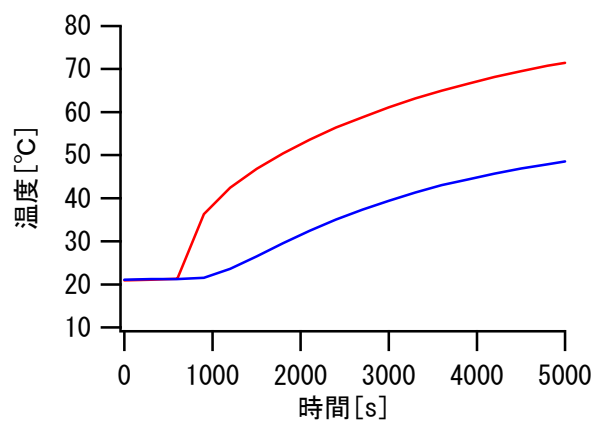


(d) 比較塗料 20V

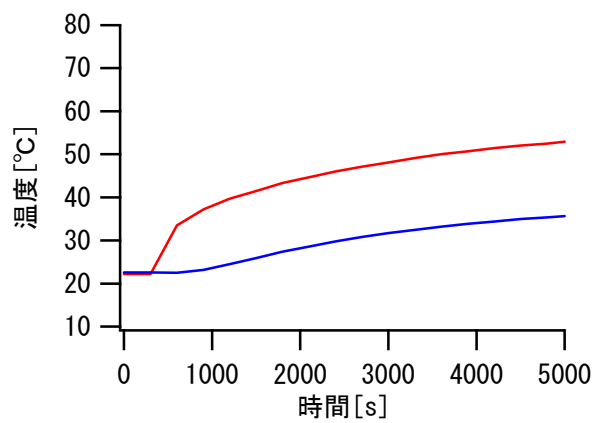
図 6.2 試験片温度[熱の流れ：裏から表]



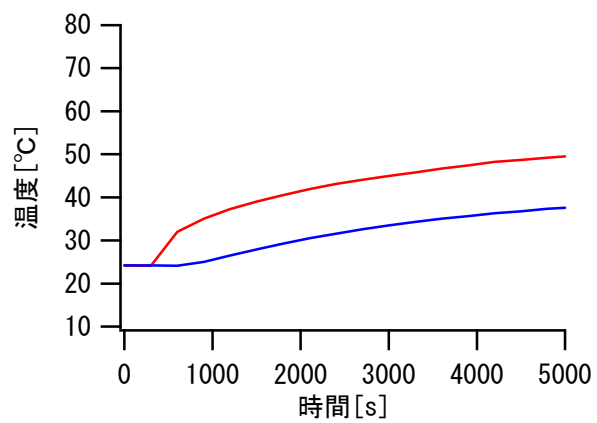
(a) 熱交換塗料 27.5V



(b) 比較塗料 27.5V

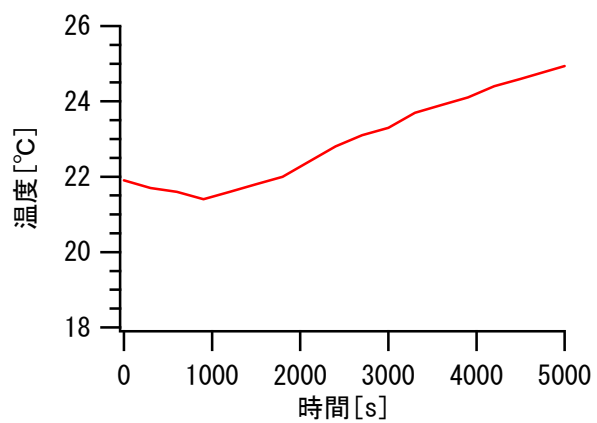


(c) 熱交換塗料 20V

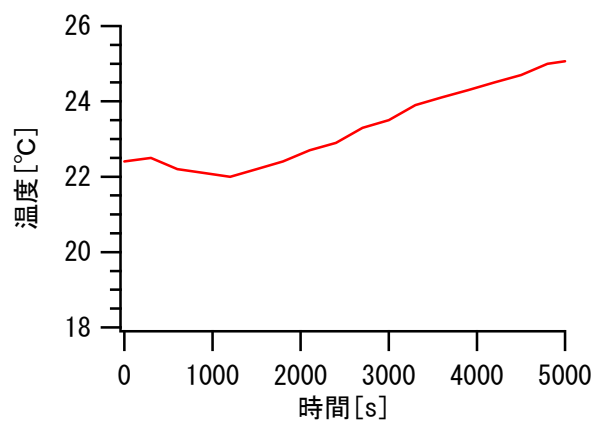


(d) 比較塗料 20V

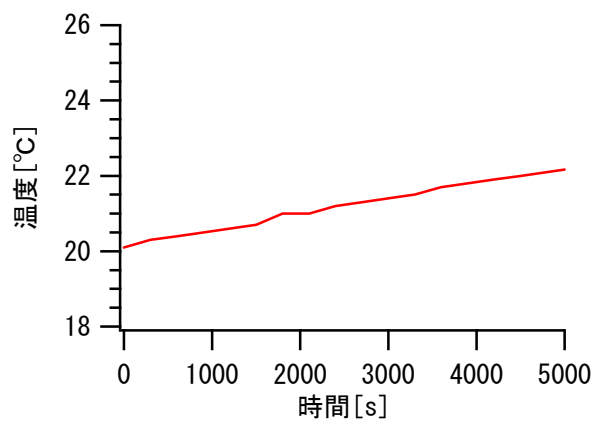
図 6.3 試験片温度[熱の流れ：表から裏]



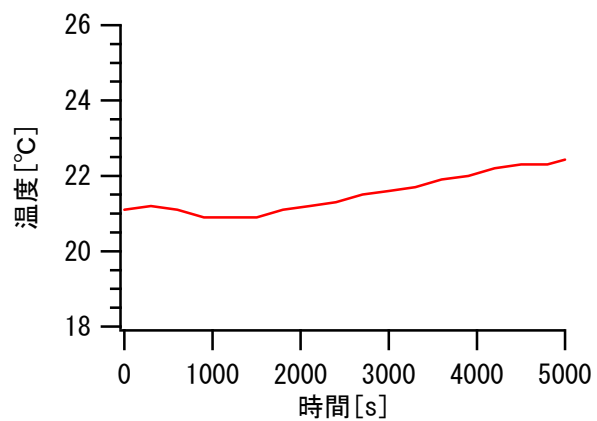
(a) 熱交換塗料 27.5V



(b) 比較塗料 27.5V

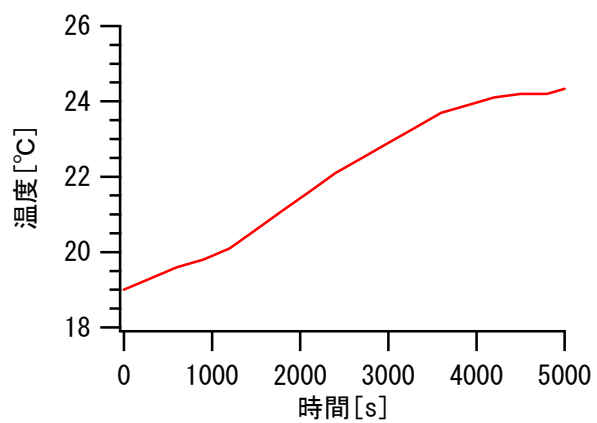


(c) 熱交換塗料 20V

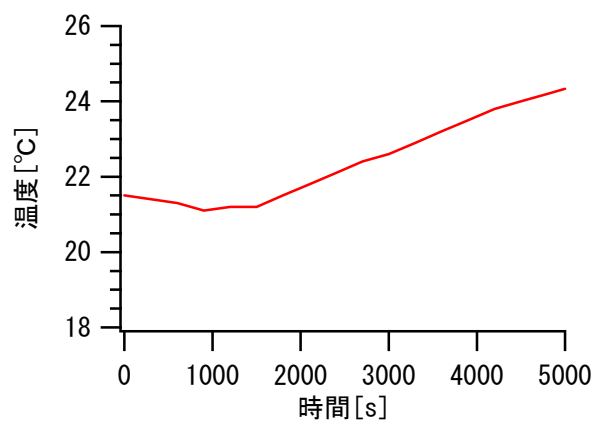


(d) 比較塗料 20V

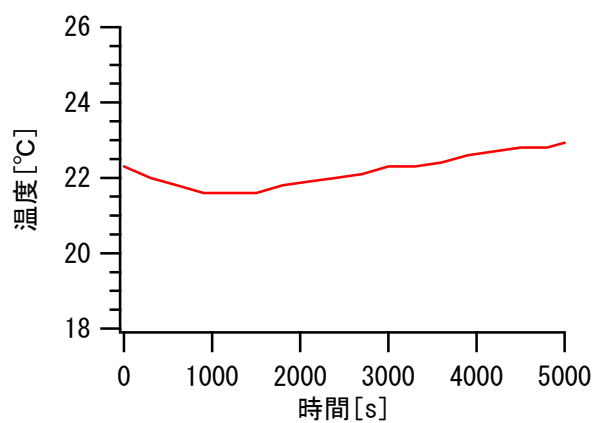
図 6.4 箱内温度[熱の流れ：裏から表]



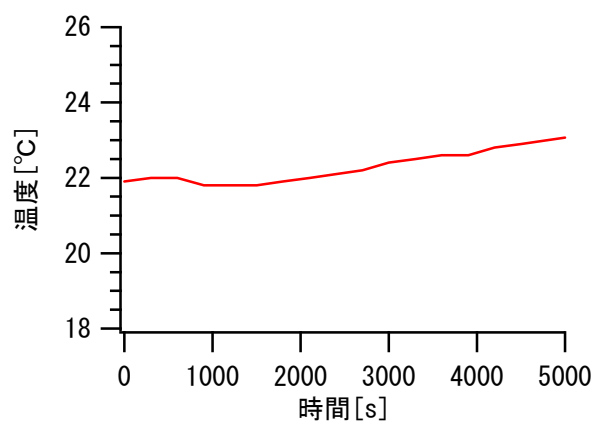
(a) 熱交換塗料 27.5V



(b) 比較塗料 27.5V

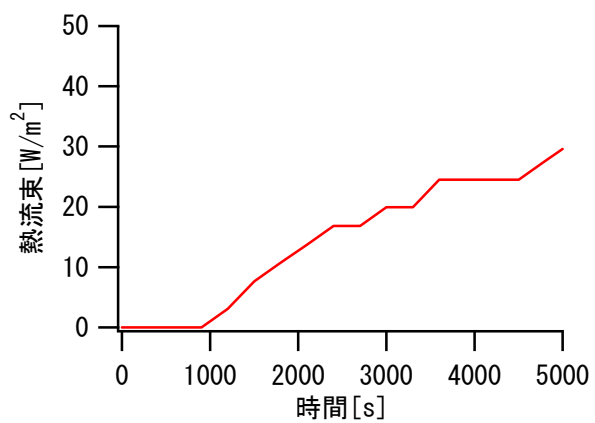


(c) 熱交換塗料 20V

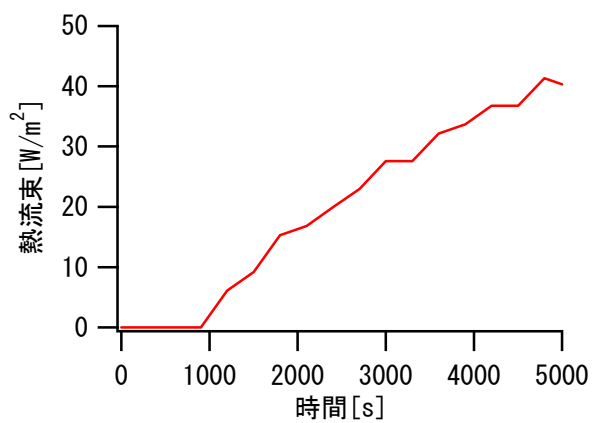


(d) 比較塗料 20V

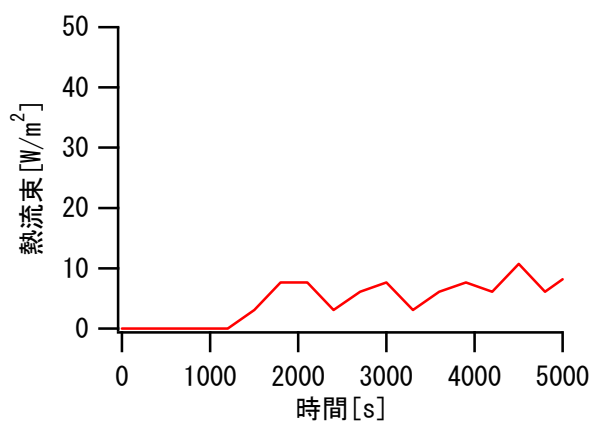
図 6.5 箱内温度[熱の流れ：表から裏]



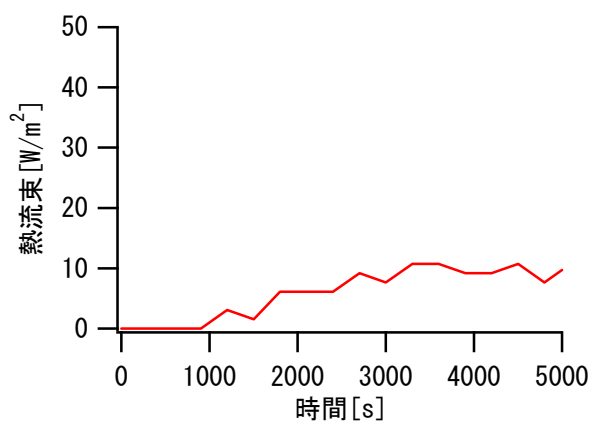
(a) 熱交換塗料 27.5V



(b) 比較塗料 27.5V

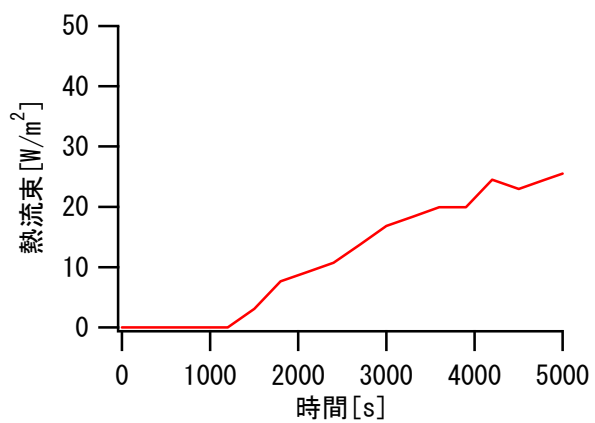


(c) 熱交換塗料 20V

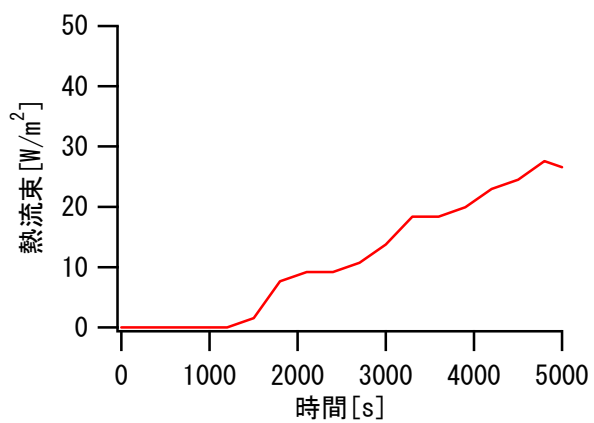


(d) 比較塗料 20V

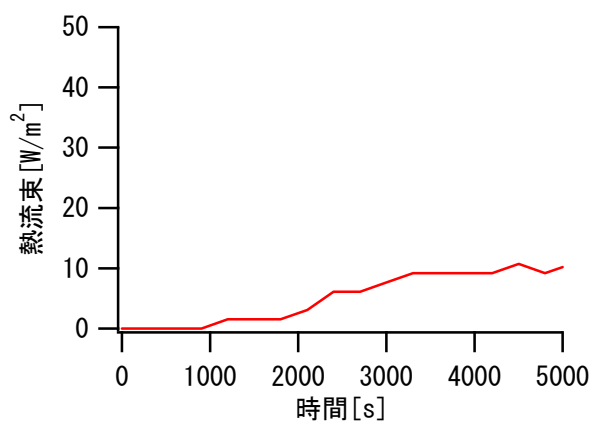
図 6.6 熱流束 [熱の流れ：裏から表]



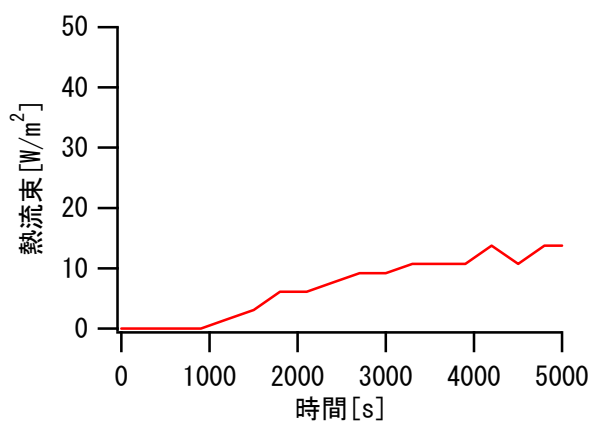
(a) 熱交換塗料 27.5V



(b) 比較塗料 27.5V



(c) 熱交換塗料 20V



(d) 比較塗料 20V

図 6.7 熱流束[熱の流れ：表から裏]

第 7 章

考察

7.1 低温域における温度特性

熱交換塗料と比較塗料で試験片を作製し、ドライアイスを使用した冷却実験、ペルチェ素子を使用した冷却実験を行い、試験片表面温度、試験片内を流れる熱流束を計測した。測定した試験片表面温度、熱流束等からフーリエの法則を用いて熱伝導率を求めた。それらの結果から低温域での熱交換塗料の温度特性を考察する。

図 4.6 のペルチェ素子を使用した冷却実験試験片表面温度に注目する。この結果において熱交換塗料の高温試験片温度低下は比較塗料の温度低下に比べ大きくなることが分かる。

図 2.12 の高温側、低温側試験片温度の差と図 2.13 の熱流束結果に注目すると、ドライアイスの昇華速度が安定する 200 分から 1500 分の間で、熱交換塗料と比較塗料の温度差がほとんどない状態においても、熱交換塗料の熱流束は比較塗料の熱流束に比べて小さくなっており、熱交換塗料において流れる熱流束が少ないことが分かる。

図 4.11 のペルチェ素子を使用した冷却実験熱流束では、熱交換塗料のほうが熱流束の値が小さい、以上の結果より熱交換塗料は比較塗料に比べ熱流束が小さいが温度変化しやすい性質があるといえる。

7.2 高温域における温度特性

熱交換塗料と比較塗料で試験片を作製し、ライト照射による加熱実験、ヒーターを使用した加熱実験を行い、試験片表面温度、試験片内を流れる熱流束を計測した。測定した試験片表面温度、熱流束等からフーリエの法則を用いて熱伝導率を求めた。それらの結果から低温域で熱交換塗料と比較塗料の結果から熱交換塗料の温度特性を考察する。

図 3.2、図 5.7 のライト照射による加熱実験、ヒーターを使用した加熱実験の試験片表面温度について注目する。ライト照射による加熱実験では熱交換塗料の最高温度と比較塗料の最高温度の差が 10℃近くあり、比較塗料のほうが高温になったが、ヒーターを使用した加熱実験では熱交換塗料の最高温度のほうが 5℃高い結果となった。実験方法により最高温度に変化が見られた。ライト照射による加熱実験とヒーターを使用した加熱実験での大きな変更点は試験片の加熱方法であり、ライト照射による加熱実験は強い光で照らすことによる加熱、ヒーターを使用した加熱実験はヒーターと試験片を密着させ加熱している。これらのことから熱交換塗料の温度特性は光にも依存しているものと考ええる。

7.3 塗料内部で成分の偏りが温度特性に及ぼす影響

第5章でのヒーターを使用した加熱実験では塗料内部の成分の偏りを考え、試験片裏面をヒーターで加熱した場合および試験片表面をヒーターで加熱した場合の実験も行った。試験片表面温度、試験片内を流れる熱流束を計測した。測定した試験片表面温度、熱流束等からフーリエの法則を用いて熱伝導率を求めた。それらの結果から加熱ヒーターが試験片に接する表裏を変えたときの熱交換塗料の結果を比較し、熱交換塗料の温度特性を考察する。

図5.9の試験片裏面をヒーターで加熱した場合と図5.10試験片表面をヒーターで加熱した場合の試験片温度結果を比べると試験片裏面をヒーターで加熱した場合のほうが温度が若干高い結果となっている。

図5.16の熱交換塗料の熱の流れを変化させた場合の熱流束比較を見ると、熱交換塗料では試験片裏面をヒーターで加熱した場合の最高熱流束値が約 $102.6[\text{W}/\text{m}^2]$ 、試験片表面をヒーターで加熱した場合が約 $153.1[\text{W}/\text{m}^2]$ となり、この結果から加熱ヒーターが試験片に接する表裏を変えたとき熱交換塗料の熱流束値に大きな違いがあることがわかった。これらの結果より、熱交換塗料は試験片内部の成分の偏りにより温度特性が変化するがわかった。

8. 結論

本研究では熱交換塗料の伝熱特性を実験により評価を行い、その結果、次の結論を得た。

1. 熱交換塗料は比較塗料に比べて塗料内部を流れる熱流束の値は小さいが温度変化が大きい。
2. 熱交換塗料の温度特性は光にも依存する。
3. 塗料内部の成分の偏りにより、熱の流れの方向に依存し熱流束値は変化する

参考文献

- 1) 藤木哲夫 他, 日本建築学会環境系論文集(2006-3)
- 2) 清水昭博 他, 日本機械学会 2005 年次大会講演論文集
- 3) 日本熱物性学会編, 熱物性ハンドブック
- 4) 日本建築総合試験所、特殊塗料の杜熱性能試験報告書
- 5) 吉田駿 他、伝熱工学の基礎、理工学社
- 6) 中道敏彦 他、塗料の本、日刊工業
- 7) 八田夏夫、熱の流れ、森北出版社

謝辞

本研究を行うにあたって、岩本勝美教授、田中健太郎准教授にはお忙しい中、終始温かいご指導とご教示を賜りましたことを、深く感謝いたします。研究方法の初歩から、研究の内容、論文作成に至るまで丁寧にご指導いただきました。また研究活動のみならず、学術的な場に参加する機会を与えてくださったことで新しい知識や見解を得ることができました。本当にありがとうございました。

本研究を進めるに際し、株式会社 ハットリ工業の皆様、豊田哲郎氏 には、多忙な中、技術的な情報を快く提供していただき、多大なご協力をいただきました。

本論文の作成にあたり有益な情報、ご指摘を頂きました東京海洋大学海洋工学部教授井上順広先生に厚くお礼を申し上げます。

大石助手、外山技官には実験装置の不具合や製作に際し、多くのご配慮とご支援をいただきました。心より感謝いたします。

研究、学生生活に関して良き相談相手でありました機械設計研究室の浅見文彦君、熱川慧君、吉田怜史君、卒業していききました先輩方の皆様、4年生のみんなに厚く御礼申し上げます。皆様と同じ研究室で過ごせたことで、本研究に全力を注いだ2年間が充実した楽しいものとなりました。本当にありがとうございました。